



Master-Arbeit für Herrn Julius REICH (Matr.-Nr. 1963706)

Evaluation des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells BASEMENT im Vergleich zum Modell HYDRO_AS-2D

Evaluation of the two-dimensional hydrodynamic-numerical model BASEMENT compared to the model HYDRO_AS-2D

Veranlassung und Thema

Hydrodynamisch-numerische Strömungsmodelle sind ein wichtiges Werkzeug zur Beschreibung von Wasserstands- und Abflussverhältnissen entlang von Gewässern sowie deren Umfeld. Solche Modelle kommen zum Einsatz, um bspw. Überschwemmungsgebiete zu ermitteln, Hochwasserschutzmaßnahmen zu planen, morphologische Entwicklungen zu untersuchen oder ökologische Fragestellungen zu beantworten.

Basierend auf der Fragestellung, der Größe des Untersuchungsgebietes, sowie der Datenverfügbarkeit kommen Modelle mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung und Dimensionalität bzgl. der Strömungsberechnung (1D-, 2D- oder 3D-Modelle) zum Einsatz. In den letzten Jahren haben sich insbesondere im Bereich der Berechnung von Überflutungsflächen und Hochwassergefahrenkarten sowie der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen, sogenannte zweidimensionalen Berechnungsmodelle als Stand der Technik etabliert. Diese Entwicklung liegt sowohl in der verbesserten Rechenleistung und den damit verbundenen Möglichkeiten im Bereich der Numerik als auch in der Zunahme an hochauflösenden Daten begründet.

Es existieren bereits eine Vielzahl an Software-Modellpakete für entsprechende Berechnungen sowie das erforderliche Pre- und Postprocessing der Eingangsdaten und der Berechnungsergebnisse. Bei einem Großteil der Modellpakete handelt es sich um kommerzielle Softwareprodukte, für die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten und die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen wird in Deutschland sehr häufig das Programm HYDRO_AS-2D verwendet.

Insbesondere im internationalen Bereich und in der Forschung hat allerdings die Anwendung von frei verfügbaren Modellen aufgrund deren vielfältiger Vorteile eine große Bedeutung. Ein vielversprechendes, frei verfügbares Modell im Bereich der zweidimensionalen

nen Fließgewässersimulation ist das Simulationswerkzeug BASEMENT der ETH Zürich. BASEMENT ermöglicht sowohl hydrodynamische als auch morphodynamische Simulationen.

Aufgabenstellung

Ziel der Masterarbeit ist es, das lizenzfrei erhältliche Modell BASEMENT bezüglich den numerischen Grundlagen, der Ergebnisqualität sowie der Anwenderfreundlichkeit mit dem am deutschen Markt etablierten Modell HYDRO-AS 2D zu vergleichen. Der Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Eignung des Modells BASEMENT für das Hochwasserrisikomanagement sowie der Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Hierzu sollen im Rahmen der Masterarbeit folgende Leistungen erbracht werden:

- Gegenüberstellung der theoretischen und numerischen Grundlagen der Modelle HYDRO_AS-2D und BASEMENT. Neben den numerischen Lösungsverfahren soll hierbei ein Schwerpunkt auf den Möglichkeiten für die Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell liegen.
- In Absprache mit den Betreuern der Arbeit: Vergleich der Modellanwendung und –ergebnisse für einen ausgewählten Fließgewässerabschnitt mit entsprechender Datenlage. Für den Fließgewässerabschnitt ist ein Modelldatensatz mit BASEMENT zu erstellen. Als Grundlage hierfür dient ein bereits bestehendes Modell im HYDRO_AS-2D-Format.
- Kalibrierung des BASEMENT-Modell anhand von Pegeldaten. Besonderes Augenmerk soll hierbei auf die Unterschiede der Kalibrierungsparameter und deren Ausprägungen im Vergleich zu HYDRO_AS-2D gelegt werden.
- Die Ergebnisse des BASEMENT-Modells sind mit den Ergebnissen der HYDRO-AS-2D-Modellierung zu vergleichen und mögliche Ursachen für Unterschiede zu identifizieren.
- Beschreibung und Bewertung der Eignung des Modells BASEMENT zur Abbildung verschiedener Hochwasserschutzmaßnahmen (technisch und naturnah).
- Neben dem Ergebnisvergleich sind auch Aspekte wie wie notwendige Bearbeitungsschritte, Qualität der Pre- und Postprocessing-Werkzeuge und die generelle Anwendbarkeit des Modells BASEMENT zu bewerten.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten.

Der/die Kandidat/in hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden. Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Hydromechanik - Gerinnehydraulik - Hochwasserschutz - Hochwasserrisikomanagement - Numerische Strömungssimulation
Ansprechpartner	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de Dr.-Ing. Michael Bach SYDRO Consult GmbH Ingenieurgesellschaft für Systemhydrologie, Wasserwirtschaft und Informationssysteme m.bach@sydro.de		
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung. Leistungszeitraum 6 Monate	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit. Präsenzzeit bei SYDRO mit Nutzung von HYDRO_AS-2D, Sachstandsbesprechungen am Institut und bei SYDRO

Darmstadt, den 19.06.2018

B. Lehmann

Prof. Boris Lehmann

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



**Evaluation des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen
Modells BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D**

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Masterthesis

von

Julius Reich

aus Frankfurt am Main (Matrikelnummer 1963706)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 26.02.2019

Tag der mündlichen Prüfung: 04.04.2019

Darmstadt, im Februar 2019

Julius Reich

Matrikelnummer: 1963706

Studiengang: M.Sc. Umweltingenieurwissenschaften

E-mail: julius-reich@gmx.de

Thema der Arbeit: „Evaluation des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D“ – „Evaluation of the two-dimensional hydrodynamic-numerical model BASEMENT compared to Hydro_AS-2D“

Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fachbereich 13: Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 7

64289 Darmstadt

Externe Betreuende:

Dipl.-Ing. Felix Froehlich, SYDRO Consult GmbH

Dr.-Ing. Michael Bach, SYDRO Consult GmbH

M.Sc. Stephan Kammerer, VAW ETH Zürich

Lizenzhinweis: CC BY 4.0 International – Creative Commons, Namensnennung

Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterthesis wird das, an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelte, frei verfügbare Software-Modellpaket BASEMENT mit dem etablierten kommerziellen Programm Hydro_AS-2D hinsichtlich der Eignung für das Hochwasserrisikomanagement verglichen. Dabei werden auch die zugehörigen Preprocessing-Werkzeuge miteinbezogen. Der Vergleich beinhaltet einen theoretischen Teil, in dem die numerischen Verfahren gegenübergestellt werden, eine Anwendung auf ein reales Fallbeispiel zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen sowie eine Durchführung von Test Cases aus der Literatur. Des Weiteren werden Aspekte der generellen praktischen Anwendbarkeit behandelt. Für das Fallbeispiel wurden umfassende Daten sowie ein bestehendes Hydro_AS-2D-Modell zur Verfügung gestellt, auf dessen Grundlage ein BASEMENT-Modell erstellt wurde. Aus dem Vergleich geht hervor, dass hinsichtlich der eingesetzten numerischen Verfahren beide Programme, von kleineren Abweichungen abgesehen, recht nah beieinander liegen. Bezüglich der Anwendung auf das reale Fallbeispiel sowie die generelle Eignung für das Hochwasserrisikomanagement bestehen derzeit in BASEMENT noch Defizite hinsichtlich der Netzerstellung sowie bei der Abbildung von Bauwerken im Modell. Die Auswertung der Test-Cases zeigt, dass BASEMENT hier, bezogen auf eine Referenzlösung nach Toro (2001), genauere Ergebnisse produziert als Hydro_AS-2D.

Abstract

In the present work the freely available numerical modelling software BASEMENT, developed at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of the ETH Zürich, is compared to the established commercial software Hydro_AS-2D. The focus of the comparison is on the software's applicability for flood risk management. The corresponding preprocessing-tools are also taken into account. The comparison includes a theoretical part contrasting the applied numerical methods, a real case study concerning flood mapping generation and the execution of two common test cases. Furthermore, aspects of general practical usability of the software are considered. Comprehensive data including an already existing Hydro_AS-2D-model was provided as a basis for setting up the BASEMENT-model. The comparison shows that differences concerning the numerical methods are relatively small. Regarding the real case study as well as the general applicability for flood risk management there are some deficiencies, especially in terms of grid generation and modelling structures in BASEMENT. The evaluation of the test cases indicates that the BASEMENT results are more accurate in relation to a reference solution by Toro (2001).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einführung	1
1.1 Vorstellung der Modelle BASEMENT und Hydro_AS-2D	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Theoretischer Modellvergleich.....	4
2.1 Hydrodynamische Grundgleichungen	5
2.1.1 Flachwassergleichungen	5
2.1.2 Bestimmung der Viskosität	6
2.1.3 Bestimmung des Reibungsgefälles	7
2.2 Numerische Verfahren.....	9
2.2.1 Diskretisierung	9
2.2.2 Rand- und Anfangsbedingungen	12
2.2.3 Interne Randbedingungen / Bauwerke	14
2.3 Möglichkeiten zur Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen	20
2.4 Netzerstellung.....	22
2.5 Zusammenfassung.....	24
3 Vergleichende Modellanwendung	25
3.1 Beschreibung des Modellgebiets und der Datengrundlage	26
3.1.1 Beschreibung des gewählten Gewässerabschnitts.....	26
3.1.2 Beschreibung der zur Verfügung gestellten Daten.....	27
3.2 Erstellung des BASEMENT-Modells	28
3.2.1 Preprocessing	28
3.2.2 Durchführung der Berechnungen.....	38
3.3 Vergleich der Ergebnisse	42
3.4 Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung	56

3.5	Anwendung auf Test-Cases.....	65
3.6	Zusammenfassung.....	70
4	Beurteilung der Anwendbarkeit von BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D.....	72
4.1	Pre- und Postprocessing-Werkzeuge	73
4.2	Programmbedienung.....	76
4.3	Schnittstellen zu anderer Software	79
5	Diskussion	80
A.	Anhang	82
A.1	Ergebnisse der Test-Cases.....	83
A.2	Verteilung der Landnutzung und der zugehörigen Rauheitsbeiwerte	93
	Literaturverzeichnis.....	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: links: cell-centered-Methode; rechts: cell-vertex-Methode	11
Abbildung 2-2: Abbildung interner Randbedingungen in Hydro_AS-2D	16
Abbildung 2-3: HID Controller in BASEMENT.	19
Abbildung 3-1: Modellgebiet	26
Abbildung 3-2: Feines Netz bei eng beieinander liegenden Bruchkanten.....	29
Abbildung 3-3: Vereinfachung der Gebäudegeometrie.....	30
Abbildung 3-4: Reduktion der Stützstellen der Grabenbruchkanten.....	30
Abbildung 3-5: Abgrenzung der Modellausdehnung anhand von Überschwemmungsflächen	31
Abbildung 3-6: Setzen von Regionpunkten	32
Abbildung 3-7: Einbinden einer Brücke als interne Randbedingung.....	33
Abbildung 3-8: Zuweisung der Material ID	34
Abbildung 3-9: Unzureichende Abbildung des Gewässerverlaufs	35
Abbildung 3-10: Vergleich der Geländeauflösung	36
Abbildung 3-11: Abgrenzung des Flussschlauchs	37
Abbildung 3-12: Absolute Höhendifferenz zwischen beiden Geländemodellen.....	37
Abbildung 3-13: Höhendifferenzen infolge unterschiedlicher Netzauflösung	38
Abbildung 3-14: Elemente mit einer Kantenlänge im Millimeterbereich.....	41
Abbildung 3-15: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S1	43
Abbildung 3-16: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D für S1	44
Abbildung 3-17: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S2	45
Abbildung 3-18: Überschwemmungsflächen im Norden des Modellgebiets	45
Abbildung 3-19: Abgrenzung der Wassertiefe im Flussschlauch	46
Abbildung 3-20: Unterschiedliche Überschwemmungsflächen im Bereich von Durchlässen	48

Abbildung 3-21: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D für S2	48
Abbildung 3-22: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S3	49
Abbildung 3-23: Entwicklung der Überschwemmungsflächen über die Zeit	50
Abbildung 3-24: Vergleich der Geländemodelle an der kritischen Stelle	50
Abbildung 3-25: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D für S3	51
Abbildung 3-26: Oben: Überschwemmungsflächen am Adolfosee, unten: Vergleich der Geländemodelle	51
Abbildung 3-27: Fließgeschwindigkeitsdifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS- 2d	52
Abbildung 3-28: Unterschiedliches Strömungsbild an einer Sohlstufe	52
Abbildung 3-29: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2d für S4	53
Abbildung 3-30: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S4	54
Abbildung 3-31: Unterschiedliche Ausbreitung der Überschwemmungsflächen entlang von Grabenstrukturen (oben) aufgrund unterschiedlicher Netzauflösung (unten)	54
Abbildung 3-32: Wasserspiegeldifferenz zwischen K1 und S3	58
Abbildung 3-33: Vergleich der Überschwemmungsflächen von K1 und S3	58
Abbildung 3-34: Wasserspiegeldifferenz zwischen K2 und S3	59
Abbildung 3-35: Vergleich der Überschwemmungsflächen zwischen K2 und S3	60
Abbildung 3-36: Wasserspiegeldifferenz infolge Variation des Gefälles am Modellrand	61
Abbildung 3-37: Wasserspiegeldifferenz infolge Variation des Gefälles am Modellrand	62
Abbildung 3-38: Vergleich der Überschwemmungsflächen zwischen BASEMENT (K7) und Hydro_AS-2D	63
Abbildung 3-39: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT (K7) und Hydro_AS-2D	64
Abbildung 3-40: Anfangszustand für Test-Case 1	66
Abbildung 3-41: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain für das grobe Netz zum Zeitpunkt $t=4s$	66

Abbildung 3-42: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain für das feine Netz zum Zeitpunkt $t=4s$	67
Abbildung 3-43: Geländehöhe für Test-Case 2.....	67
Abbildung 3-44: Initialwassertiefe für Test-Case 2.....	68
Abbildung 3-45: Wassertiefe zum Zeitpunkt $t=18s$	68
Abbildung 3-46: Wassertiefe bzw. Geländehöhe zum Zeitpunkt $t=18s$ im markierten Querschnitt.....	69
Abbildung 4-1: Workflow in BASEmesh.....	73
Abbildung 4-2: Erstellung eines Datensatzes mit BASEMENT	76
Abbildung 4-3: Bearbeitung der Zuflussganglinie in BASEMENT	77
Abbildung 4-4: Ausgabe von Warnungen während der Berechnung.....	78
Abbildung 4-5: Visualisierung mit BASEviz.....	78
Abbildung A-1: Anfangszustand	83
Abbildung A-2: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=1s$	83
Abbildung A-3: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=4s$	84
Abbildung A-4: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=5s$	84
Abbildung A-5: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=1s$ für das grobe Netz.....	85
Abbildung A-6: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=1s$ für das feine Netz.....	85
Abbildung A-7: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=4s$ für das grobe Netz.....	85
Abbildung A-8: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=4s$ für das feine Netz	86
Abbildung A-9: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=5s$ für das grobe Netz.....	86

Abbildung A-10: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt t=5s für das feine Netz	86
Abbildung A-11: Geländehöhe.....	87
Abbildung A-12: Initialwassertiefe.....	87
Abbildung A-13: Wassertiefe zum Zeitpunkt t=2s	88
Abbildung A-14: Wassertiefe zum Zeitpunkt t=6s	88
Abbildung A-15: Wassertiefe zum Zeitpunkt t=18s	89
Abbildung A-16: Wassertiefe für t=18s im markierten Querschnitt.....	89
Abbildung A-17: Querschnitt 1	90
Abbildung A-18: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt t=2s	90
Abbildung A-19: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt t=6s	90
Abbildung A-20: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt t=18s.....	91
Abbildung A-21: Querschnitt 2	91
Abbildung A-22: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 2 zum Zeitpunkt t=6s	91
Abbildung A-23: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 2 zum Zeitpunkt t=18s.....	92
Abbildung A 24: Verteilung der Landnutzung im Modell	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Simulationsläufe	38
Tabelle 3-2: Wasserspiegel am Pegel Stah in mNHN	43
Tabelle 3-3: Simulationsläufe der Sensitivitätsanalyse	57
Tabelle 3-4: Wasserspiegel am Pegel Stah für die verschiedenen Simulationsläufe	57
Tabelle 3-5: Vergleich der Sensitivität hinsichtlich Variation der Rauheitsbeiwerte	60

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

A	[L ²]	Fläche eines Kontrollvolumens
CFL		Courant-Friedrichs-Lewy
C	[m ^{1/2} /s]	Chezy-Beiwert
c _f	[-]	Reibungskoeffizient
D	[m]	hydraulischer Durchmesser
DGM		Digitales Geländemodell
FVM		Finite-Volumen-Methode
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Wassertiefe
h _o	[m]	Wassertiefe im Oberstrom
h _{Schütz}	[m]	Schützöffnungsweite
h _U	[m]	Wassertiefe im Unterstrom
h _w	[m]	Höhe der Wehrkrone [m]
I _E	[-]	Energieliniengefälle
K _i		Simulationslauf i im Rahmen der Kalibrierung / Sensitivitätsanalyse
k _s	[mm]	äquivalente Sandrauheit
k _{st}	[m ^{1/3} /s]	Rauheitsbeiwert nach Strickler
KUK		Konstruktive Bauwerksunterkante
L	[L]	charakteristische Länge
mNHN		Meter über Normalhöhennull
n	[s/m ^{1/3}]	Rauheitsbeiwert nach Manning
n _s		Einheitsvektor
Q	[m ³ /s]	Abfluss
q	[m ² /s]	spezifischer Abfluss

R	[m]	hydraulischer Radius
S	[L]	Berandung eines Kontrollvolumens
S_i		Simulationslauf i für das unkalibrierte Modell
S_{Bi}	[-]	Sohlgefälle in x- bzw. y-Richtung
S_{Fi}	[-]	Reibungsgefälle in x- bzw. y-Richtung
u^*	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
u	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung
v	[m/s]	Geschwindigkeit in y-Richtung
W-Q-Beziehung		Wasserstands-Abfluss-Beziehung
WSP	[mNHN]	Wasserspiegel
χ	[-]	Karman-Konstante
λ	[-]	Rohrreibungszahl
μ	[-]	Überfallbeiwert nach Poleni
ν	[m ² /s]	gesamte Viskosität
ν_M	[m ² /s]	molekulare Viskosität
ν_t	[m ² /s]	Wirbelviskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[-]	Abminderungsfaktor für unvollkommenen Überfall
τ_B	[N/m ²]	Sohlschubspannung

1 Einführung

In der Wasserwirtschaft ist die Anwendung hydrodynamisch-numerischer Strömungsmodelle von großer Bedeutung. Für die Ermittlung von Überschwemmungsgebieten oder zur Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen ist deren Einsatz unverzichtbarer Teil der Ingenieurspraxis geworden. In diesen Bereichen kommen am häufigsten zweidimensionale Modelle zum Einsatz, die im Gegensatz zu eindimensionalen Modellen auch Strömungsprozesse lateral zur Gewässerachse abbilden können.

Es existiert inzwischen eine Vielzahl entsprechender Softwareprodukte. Darunter befindet sich sowohl kommerzielle als auch frei verfügbare Software. Insbesondere in Deutschland wird in vielen Ingenieurbüros und öffentlichen Einrichtungen das Programm Hydro_AS-2D der Firma Hydrotec eingesetzt, wobei es sich um ein kommerzielles Softwarepaket handelt. Insbesondere im Hinblick auf die Abwicklung internationaler Projekte kommt jedoch den frei verfügbaren Software-Modellpaketen eine immer größere Bedeutung zu. Dazu zählt das an der ETH Zürich entwickelte Modell BASEMENT.

In dieser Arbeit wird anhand eines realen Fallbeispiels eine vergleichende Evaluation beider Programme durchgeführt. In Kooperation mit der SYDRO Consult GmbH und der Bezirksregierung Köln wurden umfassende Daten zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen im Einzugsgebiet der Rur zur Verfügung gestellt. Ein von der SYDRO Consult GmbH erstelltes Hydro_AS-2D-Modell lag bereits zu Beginn der Arbeit vor, auf dessen Grundlage das BASEMENT-Modell erstellt wurde. Darüber hinaus wurden beide Programme auf zwei aus der Literatur bekannte Test-Cases angewendet.

1.1 Vorstellung der Modelle BASEMENT und Hydro_AS-2D

Das Modell BASEMENT wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelt und ist kostenfrei verfügbar. Es eignet sich zur hydrodynamischen 1D- und 2D-Modellierung. Dabei sind auch Modellkopplungen möglich. Des Weiteren können morphodynamische (Geschiebe- und Schwebstofftransport) Simulationen durchgeführt werden. Im Softwarepaket enthalten ist ebenfalls das Preprocessing-Werkzeug BASEmesh, welches in das freie Geoinformationssystem QGIS eingebunden werden kann. Hinsichtlich der Visualisierung der Berechnungsergebnisse kann zwischen verschiedenen Ausgabeformaten gewählt werden, sodass mit dem Softwarepaket vom Preprocessing über die Berechnungen als solche bis hin zum Postprocessing alle Stufen der Modellierung abgedeckt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich hydrodynamische 2D-Modellierungen betrachtet.

Bei Hydro_AS-2D handelt es sich um ein kommerzielles Softwarepaket der Firma Hydrotec speziell für die zweidimensionale Simulation von Fließgewässern und den Oberflächenabfluss von Niederschlägen. Hydro_AS-2D ist ein ausschließliches Berechnungsmodul, welches in die Oberfläche des Programms SMS der Firma Aquaveo eingebunden werden muss. Preprocessing-Werkzeuge sowie Module für die Berechnung von Sedimenttransport sind gesondert zu erwerben. Für die Netzerstellung stehen die Module Flussschlauchgenerator und Laser_AS zur Verfügung. Eine Hydro_AS-2D-Lizenz liegt momentan in Abhängigkeit von der Version zwischen 1.750,00 € und 7.875,00 €. Eine Lizenz für das Zusatzmodul Flussschlauchgenerator liegt bei 750,00 €, für Laser_AS bei 5.750,00 € (alle Preise zzgl. Mehrwertsteuer) (Hydrotec 2018). Eine SMS-Lizenz für die Fließgewässermodellierung liegt bei 3.100 \$ (AQUAVEO 2018).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versionen BASEMENT 2.8 sowie Hydro_AS-2D 2.2.2 verwendet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende Evaluation von BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D. Neben dem Vergleich der numerischen Grundlagen sowie Aspekten der Anwenderfreundlichkeit steht ein praktischer Modellvergleich anhand eines realen Fallbeispiels aus der Wasserwirtschaft im Fokus der Arbeit.

In Kapitel 2 findet ein theoretischer Modellvergleich statt. Dabei werden die zugrundeliegenden hydrodynamischen Ansätze sowie die eingesetzten numerischen Verfahren gegenübergestellt. Darüber hinaus werden auch die Möglichkeiten zur Abbildung von Bauwerken und Hochwasserschutzmaßnahmen verglichen. In einem letzten Abschnitt wird auf die Netzerstellung mittels der genannten Preprocessing-Werkzeuge eingegangen. Dieser Arbeitsschritt findet zwar außerhalb von BASEMENT bzw. Hydro_AS-2D statt, jedoch sollen bei der Evaluation die zugehörigen Preprocessing-Werkzeuge ebenfalls berücksichtigt werden.

In Kapitel 3 wird eine vergleichende Modellanwendung durchgeführt. Hierfür wurde von der SYDRO Consult GmbH ein kalibriertes Hydro_AS-2D-Modell zur Verfügung gestellt. Die zugrundeliegenden topographischen und hydrologischen Daten wurden durch die Bezirksregierung Köln übergeben. Das Modell wurde zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen im Einzugsgebiet der Rur erstellt. Nach einer Vorstellung des Modellgebiets und einer Beschreibung der Datengrundlage wird gezeigt, wie für einen gewählten Gewässerabschnitt ein BASEMENT-Modell erstellt wurde. Mit dem BASEMENT-Modell wurden verschiedene stationäre Abflüsse berechnet. Hierbei wird genau auf die einzelnen Schritte der Modellierung eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse beider Modelle miteinander verglichen und Ursachen für Unterschiede herausgearbeitet. In einem letzten Teil wird auf die Arbeitsschritte der Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung eingegangen. Hierfür wird für einen ausgewählten Abfluss der Einfluss verschiedener Parameter auf den Kalibrierungsprozess analysiert und Unterschiede zu Hydro_AS-2D aufgezeigt. Darüber hinaus wurden die beiden Programme auf zwei Test-Cases angewendet. Hierbei wird die Genauigkeit der Lösungsverfahren beider Programme anhand einer Referenzlösung aus der Literatur verglichen.

In Kapitel 4 liegt ein besonderer Fokus auf der Anwendbarkeit beider Modelle in der Praxis. Hierzu zählen neben den erforderlichen Arbeitsschritten auch die Programmbedienung sowie mögliche Ausgabeformate und Schnittstellen zu anderer Software für die Visualisierung.

In Kapitel 5 findet eine abschließende Diskussion statt.

2 Theoretischer Modellvergleich

Zu Beginn dieser Arbeit sind die modelltheoretischen Unterschiede zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D beschrieben. Die entsprechenden mathematischen und physikalischen Grundlagen werden dabei nicht im Detail behandelt, sondern größtenteils vorausgesetzt.

2.1 Hydrodynamische Grundgleichungen

2.1.1 Flachwassergleichungen

Sowohl BASEMENT als auch Hydro_AS-2D basiert auf den sogenannten Flachwassergleichungen. Dabei handelt es sich um die, über die Wassertiefe integrierten, Navier-Stokes- bzw. Reynolds-Gleichungen. Dadurch werden die aufwändig zu lösenden dreidimensionalen Reynolds-Gleichungen unter Einführung mehrerer vereinfachender Annahmen um eine Dimension reduziert. Zu den Vereinfachungen zählen dabei unter anderem die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung im Fluid sowie die Vernachlässigung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente. In beiden Modellen wird dabei die konservative Form der 2D-Flachwassergleichungen verwendet. Hierbei wird statt der Geschwindigkeit der spezifische Abfluss als Unbekannte eingesetzt. Grund hierfür ist die stetige Differenzierbarkeit des spezifischen Abflusses über Sprünge hinweg (bspw. bei einem Fließwechsel) im Gegensatz zur Geschwindigkeit (ÖWAV 2014, 12). Für die Kontinuitätsgleichung wird als Variable die Wassertiefe verwendet. In Vektorschreibweise hat die Gleichung damit folgende Form:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} + \frac{\delta}{\delta x} \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0,5 gh^2 - vh \frac{\delta u}{\delta x} \\ uvh - vh \frac{\delta v}{\delta y} \end{pmatrix} + \frac{\delta}{\delta y} \begin{pmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\delta u}{\delta x} \\ v^2h + 0,5 gh^2 - uh \frac{\delta v}{\delta y} \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ gh (S_{Fx} - S_{Bx}) \\ gh (S_{Fy} - S_{By}) \end{pmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Mit:

h = Wassertiefe [m]

u = Geschwindigkeit in x-Richtung [m/s]

v = Geschwindigkeit in y-Richtung [m/s]

ν = gesamte Viskosität [m²/s]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

S_{Fi} = Reibungsgefälle in x- bzw. y-Richtung [-]

S_{Bi} = Sohlgefälle in x- bzw. y-Richtung [-]

Oder in verkürzter Form:

$$\frac{dw}{dt} + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + s = 0 \quad (2)$$

Hierbei ist w der Variablenvektor, f und g die Flüsse in x - bzw. in y -Richtung und s der Quellterm. Neben den Unbekannten h , u und v sind zudem noch das Reibungsgefälle S_{Fi} , das Sohlgefälle S_{Bi} sowie die gesamte Viskosität ν enthalten, die zunächst definiert werden müssen.

2.1.2 Bestimmung der Viskosität

Bei der Überführung der Navier-Stokes-Gleichungen in die Reynolds-Gleichungen findet eine zeitliche Mittelung der Geschwindigkeiten statt, sodass keine kleinskaligen Fluktuationen der Geschwindigkeit aufgelöst werden müssen. Die turbulenten Schwankungen werden dabei durch die sogenannten Reynolds-Spannungen berücksichtigt, welche als zusätzliche Unbekannte in der Gleichung auftauchen. Es werden daher Turbulenzmodelle benötigt, durch welche diese Unbekannten bestimmt werden können.

In beiden Programmen wird dies über das Prinzip der Wirbelviskosität umgesetzt. Hierbei wird angenommen, dass sich die turbulenten Fluktuationen wie eine zusätzliche viskose Spannung auf die Strömung auswirken (Malcherek 2009, 44).

In **BASEMENT** ist die gesamte Viskosität wie folgt definiert:

$$\nu = \nu_t + \nu_M \quad (3)$$

Hierbei ist ν_t die Wirbelviskosität und ν_M die molekulare Viskosität. Letztere wird als konstant angenommen. Die Wirbelviskosität kann entweder ebenfalls als konstant definiert werden oder dynamisch für jedes Element durch ein algebraisches Turbulenzmodell berechnet werden:

$$\nu_t = \chi u_* \frac{h}{6} \quad (4)$$

Hierbei ist χ die Kàrmàn-Konstante und u_* die Reibungsgeschwindigkeit. Letztere wird berechnet über die Sohlschubspannung τ_B :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_B}{\rho}} \quad (5)$$

Um den Einfluss der Turbulenz zu verstärken, kann zusätzlich ein dimensionsloser Turbulenzfaktor gesetzt werden, mit dem die berechnete Turbulenz multipliziert wird (Vetsch et al. 2018a, 24).

In **Hydro_AS-2D** wird die Viskosität ebenfalls über eine Kombination aus einem algebraischen Ansatz und einer bereichsweise konstanten Viskosität abgebildet (M. Nujic 2016, 9-10):

$$\nu = \nu_0 + c_\mu u_* h \quad (6)$$

ν_0 stellt dabei die über ein Element konstante Viskosität dar und kann für jedes Element definiert werden. Der zweite Term ist ein empirischer Ansatz für die Wirbelviskosität in

Abhängigkeit von der Schubspannungsgeschwindigkeit und der Wassertiefe. Der Faktor c_μ wurde empirisch bestimmt und im Programm standardmäßig zu 0,6 gesetzt. Durch diesen Ansatz kann in Bereichen besonders starker Durchmischung v_0 hochgesetzt werden, um dadurch die Turbulenz besser abzubilden.

Der Unterschied beider Ansätze liegt also im Wesentlichen darin, dass in BASEMENT das Turbulenzmodell komplett abgeschaltet werden kann und somit im gesamten Modell mit einer konstanten Viskosität gerechnet wird. In beiden Fällen kann der Einfluss der Turbulenz durch das Setzen von Faktoren erhöht werden. In BASEMENT wird die berechnete Turbulenz mit einem Turbulenzfaktor multipliziert. In Hydro_AS-2d kann eine konstante Viskosität hinzu addiert werden, die für jedes einzelne Element definierbar ist.

2.1.3 Bestimmung des Reibungsgefälles

Die Sohlreibung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, da sowohl der Wasserspiegel als auch die turbulente Durchmischung von ihr abhängen. Sie tauchen in Gleichung (1) im Quellterm s als Unbekannte S_{Fi} auf.

In BASEMENT wird das Reibungsgefälle auf Grundlage der Fließformel nach Chezy bestimmt:

$$u = C \cdot \sqrt{R \cdot I_E} \quad (7)$$

Mit:

u = Geschwindigkeit [m/s]

C = Chezy-Beiwert [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]

R = hydraulischer Radius [m]

I_E = Energieliniengefälle [-]

Durch Umstellen nach dem Energieliniengefälle bzw. dem Reibungsgefälle (Annahme $S_F = I_E$) und Einführung des Reibungskoeffizienten $c_f = \frac{C}{\sqrt{g}}$ folgt:

$$S_F = \frac{u \cdot |u|}{g \cdot c_f^2 \cdot R} \quad (8)$$

Zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten c_f kann zwischen verschiedenen Ansätzen ausgewählt werden. So kann er bspw. nach Manning-Strickler über die Beziehung

$$c_f = \frac{k_{st} \cdot R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}} \quad (9)$$

bestimmt werden oder nach verschiedenen, auf der äquivalenten Sandrauheit k_s basierenden Ansätzen. Dazu zählt bspw. der Ansatz nach Chezy:

$$c_f = 5,75 \cdot \log\left(12 \cdot \frac{R}{k_s}\right) \quad (10)$$

Oder nach Darcy-Weisbach:

$$c_f = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (11)$$

Mit:

$$f = \frac{0,24}{\log\left(\frac{12 \cdot R}{k_s}\right)} \quad (12)$$

Zudem stehen noch weitere Ansätze nach Yalin und Bezolla zur Verfügung (Vetsch et al. 2018a, 17).

In **Hydro_AS-2D** basiert die Ermittlung des Reibungsgefälles auf der Fließformel nach Darcy-Weisbach:

$$u = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot R \cdot I_E}{\lambda}} \quad (13)$$

Durch Umstellen nach dem Energieliniengefälle bzw. dem Reibungsgefälle (Annahme $S_F = I_E$) folgt:

$$S_F = \frac{u \cdot |u| \cdot \lambda}{8 \cdot g \cdot R} \quad (14)$$

Der dimensionlose Reibungsbeiwert λ wird durch Gleichsetzen mit der Fließformel nach Manning-Strickler bestimmt:

$$\lambda = 6,34 \cdot \frac{2 \cdot g \cdot n^2}{D^{\frac{1}{3}}} \quad (15)$$

Hierbei ist D der hydraulische Durchmesser ($D=4R$) und n der Manning-Beiwert ($n=1/k_{st}$). In BASEMENT kann der Anwender also zwischen verschiedenen Ansätzen wählen, während bei Hydro_AS-2D das Reibungsgefälle ausschließlich über die Darcy-Weisbach Formel unter Einbeziehung des Manning-Beiwertes bestimmt werden kann (im Programm wird vom Anwender ein k_{st} -Wert gesetzt).

2.2 Numerische Verfahren

2.2.1 Diskretisierung

Da es sich bei den Flachwassergleichungen um nichtlineare partielle Differentialgleichungen handelt, werden numerische Lösungsverfahren eingesetzt. Statt einer kontinuierlichen Lösung wird eine endliche Anzahl diskreter Lösungen der Gleichungen ermittelt. Voraussetzung hierfür ist eine zeitliche und eine räumliche Diskretisierung.

Zeitliche Diskretisierung

In **BASEMENT** erfolgt die zeitliche Diskretisierung anhand eines expliziten Eulerverfahrens 1. Ordnung.

$$w_{ij}^{n+1} = w_{ij}^n - \Delta t \cdot R(w_{ij}^n) \quad (16)$$

Hierbei kennzeichnet n Δt die Zeitebene und der Index ij das jeweilige Element. Das Residuum R umfasst die Summe aller Fluss- und Quellterme.

In **Hydro_AS-2D** wird zur zeitlichen Diskretisierung ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein explizites Runge-Kutta Verfahren 2. Ordnung. In einem ersten Schritt (Prädiktor-Schritt) werden die gesuchten Strömungsgrößen zu einem Zeitpunkt zwischen dem bekannten und dem unbekannten Zeitpunkt abgeschätzt. Im Korrektor-Schritt werden die Strömungsgrößen auf Grundlage dieser Abschätzung für den Zeitpunkt $n+1$ ermittelt (Umach 2014, 47).

$$\begin{aligned} w_{ij}^P &= w_{ij}^n - \Delta t \cdot R(w_{ij}^n) \\ w_{ij}^{n+1} &= 0,5 \cdot [w_{ij}^n + w_{ij}^P - \Delta t \cdot R(w_{ij}^P)] \end{aligned} \quad (17)$$

Im Vergleich zum expliziten Euler-Verfahren 1. Ordnung liefert das Runge-Kutta-Verfahren 2. Ordnung genauere Lösungen (Umach 2014, 42).

In beiden Programmen gilt zudem die Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) Stabilitätsbedingung:

$$\Delta t \leq \min \frac{L}{|u| + \sqrt{gh}} \quad (18)$$

Mit:

L = charakteristische Länge (entspricht i.d.R. dem Punktabstand)

u = Komponentenvektor der Strömungsgeschwindigkeit in Richtung der Punktpaar-Verbindung

Die Bedingung limitiert damit den Zeitschritt in Abhängigkeit vom Punktabstand. Sehr kleine Elemente führen somit zwangsläufig zu einem kleinen Zeitschritt.

Räumliche Diskretisierung

Sowohl in BASEMENT als auch in Hydro_AS-2D kommen unstrukturierte Netze zum Einsatz. Der Vorteil unstrukturierter Netze liegt darin, dass auch komplexe Geometrien sehr genau abgebildet werden können, da eine flexiblere Anpassung möglich ist als bei strukturierten Netzen. Die Details zur Netzerstellung sind Abschnitt 2.4 zu entnehmen.

In beiden Programmen kommen zur räumlichen Diskretisierung Finite-Volumen-Verfahren zur Anwendung. Im Gegensatz zu den Finite-Differenzen-Verfahren, sind sie auch auf unstrukturierte Netze anwendbar. Zudem handelt es sich um ein konservatives Verfahren, wodurch die Erhaltungseigenschaft automatisch gewährleistet ist (Beffa 1994, 46). Das untersuchte Gebiet wird in eine endliche Anzahl von Kontrollvolumina aufgeteilt. Über die Ränder jedes einzelnen Kontrollvolumens werden die gesuchten Größen und Flüsse bilanziert. Hierzu müssen die Ausgangsgleichungen zunächst in Integralform gebracht werden. Unter Verwendung des Integralsatzes von Gauß ergibt sich folgende Formulierung für die Flachwassergleichung:

$$\int_A \frac{dw}{dt} dA + \int_A \nabla(f, g) dA + \int_A s dA = 0$$

$$\int_A \frac{dw}{dt} dA + \int_S (f, g) \cdot n_S dS + \int_A s dA = 0$$
(19)

Mit:

A = Fläche eines Kontrollvolumens

S = Berandung eines Kontrollvolumens

n_S = Einheitsvektor auf dem jeweiligen Rand

Bei den Finite-Volumen-Verfahren wird unterschieden zwischen der cell-centered-Methode und der cell-vertex-Methode.

In **BASEMENT** kommt die cell-centered-Methode zur Anwendung. Hierbei stimmen die Kontrollvolumina mit den Elementen des Berechnungsnetzes überein. Die Ergebnisse werden einem Bezugspunkt innerhalb des jeweiligen Kontrollvolumens und damit auch innerhalb des jeweiligen Elements aus dem Berechnungsnetz zugeordnet (Martin 2011, 145). Die Geländehöheninformationen liegen somit in den Knoten jedes Kontrollvolumens. Dadurch ist eine genauere Repräsentation der Topographie möglich (Vetsch et al. 2018a, 120). Zudem besitzt die Methode gegenüber der cell-vertex-Methode Vorteile bezüglich der numerischen Stabilität (Umach 2014, 46).

In **Hydro_AS-2D** wird die cell-vertex-Methode angewendet. Hierbei stimmen Kontrollvolumina und Berechnungsnetz nicht überein. Es liegt somit ein doppeltes Netz vor. Die Kontrollvolumina werden um die Knoten des Berechnungsnetzes herum angelegt. Die Ergebnisse werden dann den Knoten des Berechnungsnetzes zugeordnet.

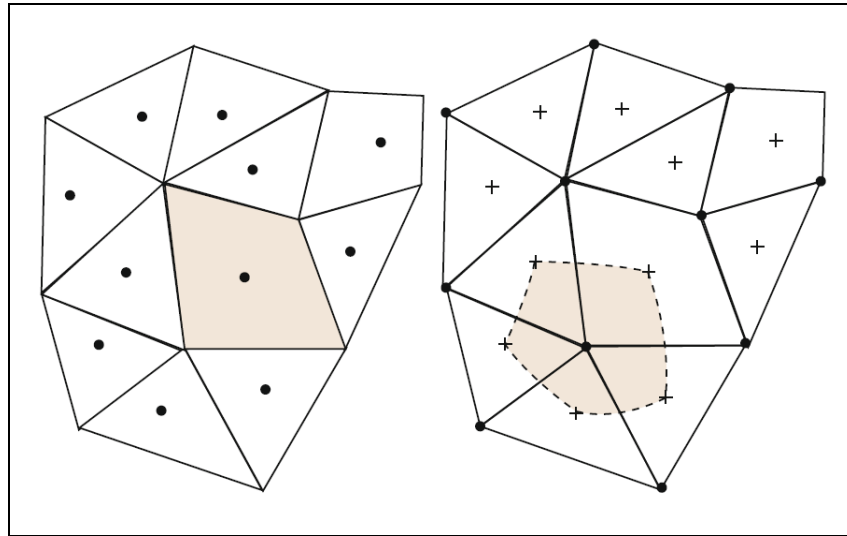


Abbildung 2-1: links: cell-centered-Methode; rechts: cell-vertex-Methode (Martin 2011, 145)

Zur Bilanzierung der einzelnen Terme aus den Flachwassergleichungen werden unterschiedliche Ansätze angewendet. In **BASEMENT** erfolgt die Ermittlung der konvektiven Flüsse anhand eines sogenannten Riemann-Lösers, wodurch auch Unstetigkeiten in der Lösung (bspw. Fließwechsel) gut abgebildet werden können. Es kann ferner zwischen einem exakten und zwei approximativen Riemann-Lösern gewählt werden (HLL und HLLC). Zur Bestimmung der diffusiven Anteile wird ein zentrales Schema nach Mohamadian et al. eingesetzt (Vetsch et al. 2018a, 81).

In **Hydro_AS-2D** werden zur Ermittlung der konvektiven Flüsse „moderne Upwind-Verfahren (sogenannte Streamline-diffusion und ENO-Filterungstechniken)“ eingesetzt (M. Nujic 2016, 19). Die Ermittlung der diffusiven Flüsse wird mit Zentraldifferenzen durchgeführt.

Am Übergang von trockenen zu nassen Elementen können Instabilitäten auftreten, wenn die Wassertiefe einen sehr geringen Wert annimmt. In beiden Programmen wird daher das Kriterium einer minimalen Wassertiefe eingeführt. Ist die Wassertiefe in einem Element geringer, wird das Element als trocken betrachtet und nicht in die Berechnung miteinbezogen. Die Ränder des Berechnungsgebietes sind also beweglich, da sich die Wassertiefe im Laufe des Simulationszeitraums ändert (Vetsch et al. 2018a, 98). In beiden Programmen kann der Wert für die minimale Wassertiefe vom Anwender geändert werden. Ein Element, welches nur teilweise mit Wasser gefüllt ist (bspw. in Böschungsbereichen) wird in **BASEMENT** als trocken definiert, wenn der Wasserspiegel unterhalb des Zentrums des Elements liegt (Rousselot 2013, 11). In **Hydro_AS-2D** hingegen werden die Ergebnisse, wie bereits erwähnt, auf die Knoten geschrieben. Eine Besonderheit am Übergang von nassen zu trockenen Elementen ist, dass jeweils dem ersten Nachbarknoten, der nicht mehr unter Wasser steht, ein extrapolierte Wasserspiegel zugewiesen wird. Erst der übernächste Knoten wird als trocken definiert. Hierdurch ist eine gleichförmigere Abgrenzung zwischen trockenen und nassen Elementen möglich (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3, S.46).

2.2.2 Rand- und Anfangsbedingungen

Zur Lösung einer partiellen Differentialgleichung werden Randbedingungen benötigt. Im instationären Fall sind zudem Anfangsbedingungen zu definieren. Grundsätzlich kann zwischen offenen und geschlossenen Rändern im Modell unterschieden werden. Über geschlossene Ränder findet kein Massentransport statt. Offene Ränder können dagegen durchströmt werden.

In BASEMENT und in Hydro_AS-2D werden alle Modellränder, wenn vom Benutzer nicht anders definiert, als geschlossene Ränder (unendlich hohe Wände) gesetzt. In **BASEMENT** kann die Wand entweder als slip-velocity Randbedingung definiert werden (keine Tangentialspannungen) oder alternativ eine Wandreibung vorgegeben werden. In **Hydro_AS-2D** sind die Wände immer als slip-velocity Randbedingung definiert. Zur Kompensation der fehlenden Wandreibung kann die Sohlrauheit in den Randzellen entsprechend hoch gesetzt werden (M. Nujic 2016, 11).

Zulauftrandbedingung

Am Zulauftrand wird sowohl in BASEMENT als auch in Hydro_AS-2D eine Abflussganglinie benötigt. In **BASEMENT** wird vom Anwender eine Liste von Knoten bzw. Kanten übergeben, die den Zulaufbereich im Modell repräsentieren. Die Knoten müssen dabei auf dem Modellrand liegen. Es kann zwischen zwei verschiedenen Arten von Zulauftrandbedingungen gewählt werden: „hydrograph“ und „zhydrograph“. Beim Typ hydrograph muss eine Zuflussganglinie definiert werden, welche die Zeit und den korrespondierenden Abfluss enthält. Die Ganglinie kann sowohl stationär als auch instationär definiert werden. Im stationären Fall wird zu Beginn der Simulation der Abfluss gleichmäßig von Null auf den definierten Wert erhöht und bleibt dann konstant. Im instationären Fall werden die Abflüsse zwischen den vorgegebenen Zeitschritten interpoliert. Die Geschwindigkeitsvektoren stehen senkrecht auf den Zulaufkanten und der Wasserspiegel wird als gleichmäßig über den Zulaufquerschnitt angenommen. Dieser wird aus Werten des vorherigen Zeitschrittes der benachbarten Elemente bezogen. Im Fall eines trockenen Anfangszustands muss ein Sohlgefälle definiert werden, um den Wasserspiegel unter Normalabflussbedingungen zu berechnen (Vetsch et al. 2018a, 44). Die Verteilung des Abflusses über die einzelnen Zulaufkanten erfolgt über einen Wichtungsfaktor. Standardmäßig hängt dieser von der lokalen Wassertiefe und der Rauheit des jeweiligen Elementes ab. Alternativ kann auch ein Wichtungsfaktor nur in Abhängigkeit von der benetzten Fläche gewählt werden. Die Zulauftrandbedingung vom Typ zhydrograph kann verwendet werden, um einen konstanten Wasserspiegel im Gebiet aufrechtzuerhalten. Es erfolgt dann nur ein Zufluss, wenn der Wasserspiegel unter den vorgegebenen Wert sinkt.

In **Hydro_AS-2D** wird ebenfalls eine Liste von Knoten („nodestrings“) übergeben, um die Geometrie des Zulauftrands zu definieren. Die Knoten müssen nicht zwangsläufig auf dem Modellrand liegen, es kann auch ein Zulauf innerhalb des Modellgebietes definiert werden. Darüber kann bspw. der Zufluss eines Nebengewässers integriert werden. Es muss immer eine Zuflussganglinie übergeben werden. Die Berechnung ist stets instationär. Soll eine stationäre Berechnung durchgeführt werden, muss manuell eine Anstiegs-

zeit definiert werden. Neben der Definition des Abflusses über die Zeit kann eine Zulaufrichtung vorgegeben werden. Diese ist also nicht zwangsläufig senkrecht zum Zulauftrand. Auch in Hydro_AS-2D erfolgt die Berechnung der Wassertiefe durch Interpolation aus den benachbarten Elementen. Die Wichtung des Abflusses über die einzelnen Kanten erfolgt auch hier in Abhängigkeit der lokalen Wassertiefe (M. Nujic 2016, 11). Eine weitere Wichtungsoption ist nicht verfügbar.

Auslaufrandbedingung

Am Auslaufrand stehen in **BASEMENT** verschiedene Optionen zur Verfügung. Zum einen kann eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung („hq-relation“) definiert werden. In Tabellenform erfolgt die Vorgabe von Wasserständen und zugehörigen Abflüssen am Auslaufrand. Dazwischenliegende Werte werden interpoliert. Wie bei der Zulaufbedingung sind die Geschwindigkeitsvektoren senkrecht zum Auslaufrand und die Wasserstände werden aus den Werten des vorherigen Zeitschrittes der benachbarten Elemente bezogen. Für die Wichtung des Abflusses über die einzelnen Kanten stehen dieselben Optionen wie beim Zulauf zur Verfügung. Alternativ kann die Wasserstands-Abfluss-Beziehung über Vorgabe eines Energieliniengefälles und unter Annahme von Normalabflussbedingungen berechnet werden. Ein weiterer Typ ist die sogenannte „zero gradient“ Randbedingung, bei der in den Kanten am Auslaufrand die Gradienten von Wasserstand und Geschwindigkeiten zu Null gesetzt werden. Diese Art von Randbedingung eignet sich insbesondere, wenn keine Informationen über den Auslaufrand bekannt sind (Vetsch et al. 2018a, 89). Des Weiteren können auch Wehre oder Schütze sowie die bereits erwähnte Randbedingung vom Typ zhydrograph als Auslauf definiert werden.

In **Hydro_AS-2D** wird standardmäßig eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung als Auslaufrandbedingung eingesetzt. Auch hier kann dies entweder als eine allgemeine Wasserstands-Abfluss-Beziehung in Tabellenform oder durch Vorgabe eines mittleren Energieliniengefälles und unter Annahme von Normalabflussbedingungen geschehen. Abgesehen davon kann auch eine Abflussganglinie als Auslaufrandbedingung definiert werden.

Wie aus dem Vergleich hervorgeht, bietet **BASEMENT** einige zusätzliche Optionen für die Definition der Randbedingungen. Allerdings besteht dabei die Einschränkung, dass in **BASEMENT** Zu- und Auslaufrandbedingungen immer auf dem Modellrand definiert werden müssen. In **Hydro_AS-2D** kann dagegen bspw. ein Zulauf auch innerhalb des Modellgebiets definiert werden. Grundsätzlich ist immer darauf zu achten, dass die Wahl der Randbedingung einen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben kann. Aus diesem Grund sollten die Modellränder stets in ausreichendem Abstand zum Untersuchungsgebiet liegen, damit etwaige Störungen oder Ungenauigkeiten abklingen können (M. Nujic 2016, 12).

Anfangsbedingungen

Durch die Festlegung der Anfangsbedingungen wird der Strömungszustand zu Beginn der Simulation definiert. In **BASEMENT** stehen dafür drei Optionen zur Verfügung. Zum

einen kann für das gesamte Gebiet ein trockener Anfangszustand angegeben werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, an einen frei wählbaren Zeitschritt aus einer vorherigen Simulation anzuknüpfen. Bei der dritten Option kann durch Übergabe einer Liste jeder Material ID eine Geschwindigkeit in x- und y-Richtung sowie eine Wassertiefe oder ein Wasserspiegel zugewiesen werden. Somit ist für jedes Element (entsprechend seiner Material ID) ein Anfangszustand definiert.

Hydro_AS-2D bietet weitestgehend dieselben Möglichkeiten. Auch hier kann ein trockener Anfangszustand gewählt oder an eine vorherige Simulation angeknüpft werden. Über das Programm SMS kann zudem jedem einzelnen Knoten ein Wasserspiegel zugeordnet werden.

Der Unterschied besteht also im Wesentlichen darin, dass in BASEMENT die Vorgabe einer anfänglichen Wassertiefe nur aus einem vorherigen Simulationslauf oder über die Material ID möglich ist. Es kann also nicht jedem Element eine individuelle anfängliche Wassertiefe zugewiesen werden.

2.2.3 Interne Randbedingungen / Bauwerke

Für Anwendungsfälle, bei denen das Strömungsgeschehen durch die Flachwassergleichungen nicht mehr realitätsnah abgebildet werden kann, da eine oder mehrere der zugrundeliegenden vereinfachenden Annahmen verletzt werden, müssen interne Randbedingungen definiert werden. Dies gilt insbesondere für durch- und überströmte Bauwerke wie Wehre, Schütze, Durchlässe oder überströmte Brücken. Liegen solche Bauwerke im Modellgebiet, werden die Strömungsgrößen für die entsprechenden Elemente nicht über die Flachwassergleichungen, sondern i.d.R. über empirische Ansätze berechnet. Im Folgenden werden überströmte und durchströmte Bauwerke separat behandelt.

Überströmte Bauwerke

Für jede interne Randbedingungen muss in **BASEMENT** je eine Liste mit Knoten für den Zulaufquerschnitt und eine Liste für den Auslaufquerschnitt übergeben werden. Die Elemente dazwischen werden aus dem Netz heraus „geschnitten“. Für diese Elemente werden nicht mehr die Flachwassergleichungen berechnet, sondern es wird ein empirischer Ansatz angewendet. Für die Abbildung von überströmten Bauwerken steht in BASEMENT die interne Randbedingung vom Typ „Weir“ zur Verfügung. Der Ansatz basiert auf der Formel nach Poleni:

$$q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \sqrt{2g \cdot (h_o - h_w)^3} \quad (20)$$

Mit:

μ = Überfallbeiwert nach Poleni [-]

σ = Abminderungsfaktor für unvollkommenen Überfall [-]

h_o = Wassertiefe im Oberwasser [m]

h_w = Höhe der Wehrkrone [m]

q = spezifischer Abfluss [m^2/s]

Der Abminderungsfaktor σ wird nach folgendem Diagramm berechnet:

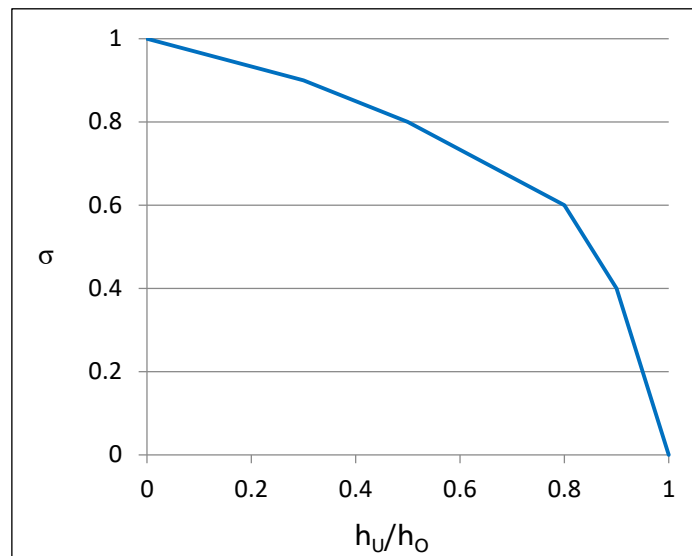


Diagramm 1: Berechnung des Abminderungsfaktors σ in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Unter- und Oberwasserstand

Alternativ kann ein konstanter Überfallbeiwert vom Benutzer definiert werden. Die Werte für h_O werden aus den benachbarten Elementen, unter Annahme eines konstanten Wasserspiegels im Element, übernommen. Die Wehrkronenhöhe muss in Abhängigkeit von der Zeit in Tabellenform übergeben werden. Dazwischenliegende Werte werden automatisch interpoliert. Ist die Wassertiefe am Zustrom geringer als die Wehrkronenhöhe, verhält sich die interne Randbedingung wie eine undurchströmbare Wand. Ist die Wassertiefe im Unterwasser geringer als die Wehrkronenhöhe, wird σ zu 1 gesetzt.

In **Hydro_AS-2D** wird eine interne Randbedingung über Punkt-Verbindungspaare definiert. Dabei werden jedem Punkt-Verbindungspaar entsprechend dem Randbedingungstyp verschiedene Parameter zugewiesen (u.a. die abflusswirksame Breite). Bei längeren Bauwerken wird empfohlen, mehrere Punkt-Verbindungspaare zu definieren, die dann jeweils ein Bauwerkssegment darstellen (siehe Abbildung 2-2). Für die Abbildung von überströmten Bauwerken wird in Hydro_AS-2D ebenfalls die Formel nach Poleni verwendet (siehe Gleichung (20)). Der Überfallbeiwert μ kann dabei entweder nach Poleni oder nach Du Buat vorgegeben werden. Der Abminderungsfaktor σ wird folgendermaßen berechnet (entspricht näherungsweise Diagramm 1) :

$$\sigma = \sqrt{1 - \left(\frac{h_U}{h_O}\right)^{1,6}} \quad (21)$$

Mit:

h_U = Wassertiefe im Unterstrom

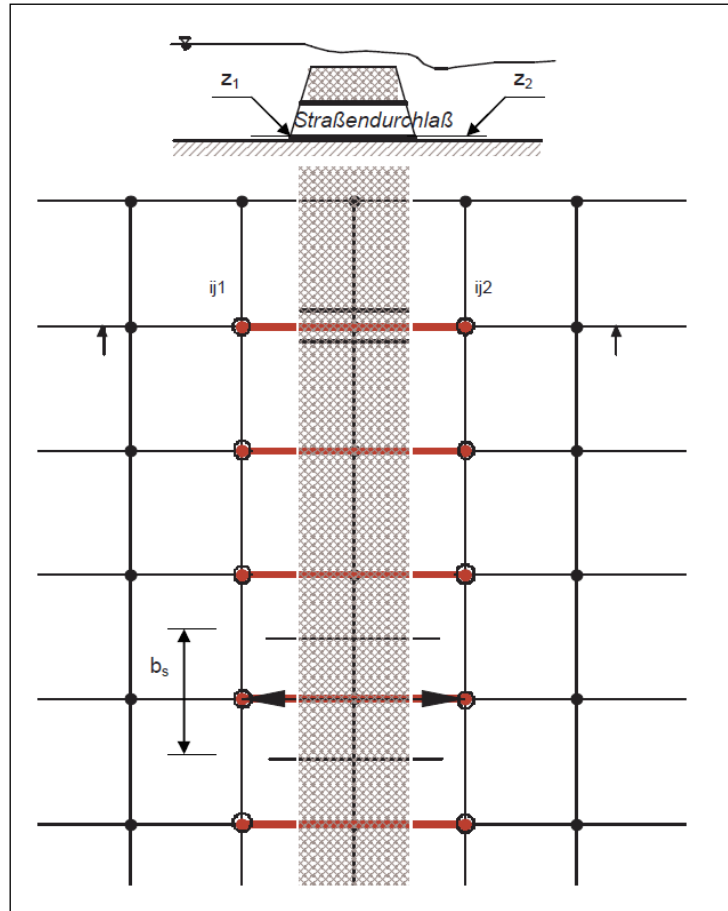


Abbildung 2-2: Abbildung interner Randbedingungen in Hydro_AS-2D (M. Nujic 2016, 36)

Durchströmte Bauwerke

In **BASEMENT** steht für durchströmte Bauwerke die interne Randbedingung vom Typ „Gate“ zur Verfügung. Der Durchfluss wird dabei nach folgendem Ansatz berechnet:

$$q = \mu \cdot h_{\text{Schütz}} \cdot \sqrt{2g \cdot h_o} \quad (22)$$

Mit:

μ = Ausflussbeiwert [-]

$h_{\text{Schütz}}$ = Schützöffnungshöhe – Geländehöhe [m]

Der Ausflussbeiwert kann entweder konstant gesetzt oder dynamisch nach folgendem Ansatz berechnet werden :

$$\mu = \delta \cdot \sqrt{\left[1 - 2 \frac{\delta \cdot h_{\text{Schütz}}}{h_o} \cdot \left(1 - \frac{\delta \cdot h_{\text{Schütz}}}{h_U}\right)\right] - \sqrt{\left[1 - 2 \frac{\delta \cdot h_{\text{Schütz}}}{h_o} \cdot \left(1 - \frac{\delta \cdot h_{\text{Schütz}}}{h_U}\right)\right]^2 + \left(\frac{h_U}{h_o}\right)^2} - 1} \quad (23)$$

Mit:

$$\delta = \frac{1}{1 + 0,64 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h_{\text{Schütz}}}{h_0}\right)^2}} \quad (24)$$

Es muss zudem, wie beim Typ „Weir“, eine Tabelle mit Werten für die Schützöffnungshöhe in Abhängigkeit von der Zeit übergeben werden. Die Schützunterkante verläuft immer horizontal. Kreis- oder bogenförmige Öffnungen können daher nicht abgebildet werden. Die Randbedingung ist nur aktiv, wenn der Oberwasserstand im benachbarten Element über der Schützöffnungshöhe liegt. Optional kann zudem ein sogenannter „Momentum factor“ definiert werden, der mit den Impulstermen multipliziert wird. Dieser Randbedingungstyp eignet sich beispielsweise, um Schütze oder eingestaute Brücken abzubilden. Eine weitere Möglichkeit zur Abbildung von durchströmten Bauwerken in BASEMENT stellt die interne Randbedingung vom Typ „hq-relation“ dar. Hierbei muss eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung (wie bei der Auslaufrandbedingung) übergeben werden. Der Wasserstand wird für jede Kante am jeweils benachbarten Element abgegriffen. Es wird dann der Durchfluss für jede Kante, skaliert auf die Kantenbreite, berechnet. Darüber können Bauwerke wie Durchlässe oder auch Rohrströmungen abgebildet werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt jedoch stark von der bereitgestellten Wasserstands-Abfluss-Beziehung ab (Vetsch et al. 2018a, 97). Sie kann daher also nur bei ausreichender Datenlage eingesetzt werden. Im Unterschied zu den anderen internen Randbedingungen kann diese Randbedingung nur in eine Richtung durchströmt werden. Es kann kein Einfluss des Unterwassers berücksichtigt werden. Durchlässe, Rohrströmungen oder überströmte Brücken können somit derzeit nur eingeschränkt abgebildet werden.

In **Hydro_AS-2D** kann zur besseren Abbildung von durchströmten Bauwerken einzelnen Knoten eine konstruktive Bauwerksunterkante (KUK) zugewiesen werden. Hierdurch kann ein Druckabfluss (bspw. eine eingestaute Brücke oder ein Durchlass) simuliert werden. Es besteht zudem die Möglichkeit, einem Bauwerk eine KUK zuzuweisen und parallel einen Wehrüberfall zu implementieren. Dies eignet sich beispielsweise dazu, Bauwerke abzubilden, die gleichzeitig durch- und überströmt werden (bspw. überströmte Brücken). Im Falle von Durchlässen kann der überströmte Anteil weiterhin mittels Flachwassergleichungen gelöst werden (M. Nujic 2016, 37). Da die KUK knotenweise definiert werden kann, ist zudem eine flexible Anpassung der Höhe an die Bauwerksgeometrie möglich. Dies ist bspw. bei bogenförmigen Brücken relevant. Insgesamt wird bei den durchströmten Bauwerken zwischen vier verschiedenen Abflusstypen unterschieden. Je nachdem, ob ein Fließwechsel auftritt und ob der Abflussquerschnitt vollständig oder nur teilweise gefüllt ist, kommen unterschiedliche Ansätze zum Einsatz. Die Grundformel ist wie folgt definiert:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H} \quad (25)$$

Hierbei ist A die maßgebliche durchströmte Querschnittsfläche und ΔH die Differenz zwischen Oberwasserstand und dem maßgebenden Wasserstand im Querschnitt. Je

nach Fall ergeben sich unterschiedliche Querschnitte A und Wasserspiegeldifferenzen ΔH , die im Detail (M. Nujic 2016, 14-16) zu entnehmen sind. Durch diese Fallunterscheidungen und die Möglichkeit der Definition einer KUK können Druckabfluss und Unterwassereinfluss berücksichtigt werden. Es können neben Schützen somit auch Durchlässe und Rohrströmungen abgebildet werden.

Hinsichtlich der Abbildung von Bauwerken bietet Hydro_AS-2D somit mehr Möglichkeiten. Insbesondere bei der Abbildung durchströmter Bauwerke weist BASEMENT derzeit noch Defizite auf. Wie bereits eingangs erwähnt, liegen im Bereich von Bauwerken oftmals dreidimensionale Strömungsprozesse vor. Diese werden versucht, durch die internen Randbedingungen approximierend abzubilden. Die Ergebnisse an solchen Stellen sollten daher stets kritisch hinterfragt und auf Plausibilität überprüft werden. Gegebenenfalls sind Parameteranpassungen durchzuführen.

Modellsteuerung

In beiden Programmen existieren Möglichkeiten, die Randbedingungen über Controller bzw. Scripting zu steuern. Auf diese Weise kann bspw. die Öffnung oder die Höhe eines Bauwerks in Abhängigkeit von Wasserspiegel oder Durchfluss variiert werden.

In **BASEMENT** können hierzu sogenannte Controller definiert werden. Hierbei wird unterschieden zwischen den Typen HID (Human Interface Device) und PID (Proportional Integral Derivative). Beim HID können vom Anwender während der Simulation ausgewählte Randbedingungen verändert werden wie bspw. die Wehrkronenhöhe oder auch die Zuflussganglinie. Es kann dazu eine zu überwachende Variable (z.B. der Wasserspiegel in einem bestimmten Element oder der Durchfluss durch einen vorgegebenen Querschnitt) und eine zu ändernde Variable (z.B. die Wehrkronenhöhe) definiert werden. Über eine graphische Benutzeroberfläche kann dann während der Simulation die Randbedingung durch Eingabe verändert werden und gleichzeitig der Effekt auf die überwachte Variable an der festgelegten Position überprüft werden (siehe Abbildung 2-3). Beim PID werden ebenfalls zu überwachende und zu ändernde Variablen definiert. Zusätzlich kann ein Zielwert für die überwachte Variable festgelegt werden. Durch das Setzen von Faktoren (P.-I.- und D.-Faktoren) kann eine Abhängigkeit zwischen der zu ändernden und der überwachten Variable definiert werden. Es muss also durch das Setzen dieser Faktoren vorgegeben werden, wie die zu ändernde Variable auf Schwankungen der überwachten Variablen reagieren soll. Die Wahl dieser Faktoren ist ausschlaggebend für eine korrekte Steuerung und stark abhängig von der jeweiligen Situation. Die Implementation eines solchen Controllers erfordert daher viel Sorgfalt und Erfahrung (Vetsch et al. 2018b, 107). Es können auch mehrere zu überwachende und zu ändernde Variable definiert werden, wodurch eine Vielzahl von Steuerungsmöglichkeiten abbildbar ist.

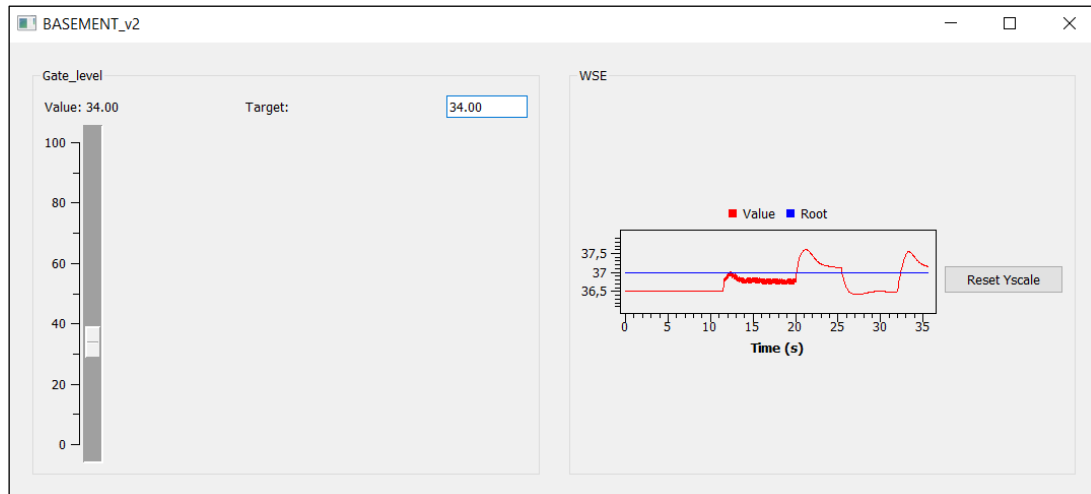


Abbildung 2-3: HID Controller in BASEMENT: Links kann der Wert der zu ändernden Variablen gesetzt werden. Rechts kann die Auswirkung auf die überwachte Variable beobachtet werden.

In **Hydro_AS-2D** wurde mit der Version 5.0 die Modellsteuerung mit Scripting eingeführt. Hierbei werden Skripte auf Basis der Programmiersprache „Lua“ in Hydro_AS-2D integriert, die in jedem Zeitschritt aufgerufen und abgearbeitet werden. Dies eröffnet unter anderem hinsichtlich der internen Randbedingungen vielfältige Möglichkeiten für die Abbildung von gesteuerten Bauwerken. So können auch hier Bauwerksöffnungen und -höhen in Abhängigkeit von Messgrößen wie Wasserspiegel und Durchfluss gesteuert werden (Rothe und Loch 2018, 6).

2.3 Möglichkeiten zur Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Da ein Fokus dieser Arbeit auf der praktischen Modellanwendung, insbesondere im Bereich des Hochwasserrisikomanagements, liegt, werden im Folgenden die Möglichkeiten beider Programme zur Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen gegenübergestellt. Dabei werden sowohl technische als auch naturnahe Maßnahmen berücksichtigt.

Viele Hochwasserschutzmaßnahmen wie bspw. Wände, Dämme oder auch Gerinneaufweitungen werden im Modell allein durch eine Transformation des Geländes abgebildet. Grundsätzlich müssen solche Maßnahmen also direkt im Preprocessing bei der Netzerstellung berücksichtigt werden. Nachträglich können zwar bspw. die Höhen einzelner Knoten mit entsprechender Netzbearbeitungssoftware (z.B. SMS) verändert werden, die Abbildung neuer Strukturen oder veränderter Fließquerschnitte lässt sich auf diesem Weg jedoch nur umständlich umsetzen. Zur Abbildung einer Hochwasserschutzwand oder eines Damms, im Sinne eines nicht überströmbaren Hindernisses, können sowohl in BASEMENT als auch in Hydro_AS-2D die entsprechenden Elemente aus dem Netz heraus geschnitten (BASEMENT) bzw. als undurchströmbar gesetzt werden (Hydro_AS-2D). Die angrenzenden Elementkanten werden vom Programm dann als unendlich hohe Wände abgebildet. Sollen die Wände jedoch eine bestimmte Höhe haben und im kritischen Fall überströmbar sein, muss dies unter Vorgabe von Geometrie und Höheninformationen bei der Netzerstellung berücksichtigt werden.

Die Abbildung von veränderten Landnutzungen wie bspw. durch Auengestaltungsmaßnahmen können in beiden Programmen durch Variation der Rauheitsbeiwerte umgesetzt werden.

Hinsichtlich der Abbildung von Entlastungsbauwerken wie Durchlässen oder Poldern (gesteuert und ungesteuert) existieren einige Unterschiede zwischen beiden Programmen. In **BASEMENT** gibt es keine direkte Möglichkeit, Durchlässe abzubilden. Durchlässe haben die Eigenschaft, dass sie gleichzeitig durch- und überströmbar sein können. Außerdem kann die Strömung unter Druck geraten. Dies kann in BASEMENT nur unter Vorgabe einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung umgesetzt werden. Es sind also entsprechende hydraulische Informationen erforderlich. Diese Randbedingung hat zudem die Einschränkung, dass sie nur in eine Richtung durchströmbar ist und keine Unterwassereinflüsse berücksichtigt werden können. In **Hydro_AS-2D** gibt es für Durchlässe eine eigene interne Randbedingung. Durch die Möglichkeit, die betroffenen Elemente parallel weiterhin über die Flachwassergleichungen zu berechnen, kann die Randbedingung gleichzeitig durch- und überströmt werden. Ist der Fließquerschnitt vollgefüllt, wird entsprechend mit Druckabfluss gerechnet. Zudem wird der Einfluss des Unterwassers einbezogen.

Das Einlassbauwerk eines Polders kann in **BASEMENT** über die interne Randbedingung vom Typ „Gate“ abgebildet werden. Im ungesteuerten Fall kann eine konstante Öffnungshöhe eingestellt werden. Für die Simulation eines gesteuerten Polders kann die

Öffnungshöhe in Abhängigkeit von der Zeit definiert werden. Dies macht jedoch nur bei Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Hochwasserwelle Sinn. Durch die Durchführung mehrerer Simulationen könnte dieser iterativ bestimmt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Controller zu definieren. Hierdurch kann die Öffnungshöhe in Abhängigkeit von Wasserspiegel oder Durchfluss gesteuert werden. In **Hydro_AS-2D** kann das Einlassbauwerk eines Polders entweder durch eine interne Randbedingung vom Typ Durchlass oder durch das Setzen von konstruktiven Bauwerksunterkanten abgebildet werden. Seit der Version 5.0 besteht die Möglichkeit, Bauwerke über Scripting zu steuern. Dies ermöglicht ebenfalls, die Öffnungshöhe des Einlassbauwerkes in Abhängigkeit von Wasserspiegel oder Durchfluss zu variieren.

Der größte Unterschied hinsichtlich der Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen liegt somit (analog zu den internen Randbedingungen) bei der Simulation durchströmter Bauwerke. Hierzu sind die Möglichkeiten in **Hydro_AS-2D** vielfältiger.

2.4 Netzerstellung

Die Netzerstellung als Teil des Preprocessings findet nicht in BASEMENT bzw. Hydro_AS-2D direkt statt. Für beide Programme gibt es eigene Werkzeuge für die Netzerstellung. Somit wurde dieser Aspekt an das Ende dieses Kapitels gestellt, da die entsprechenden Arbeitsschritte außerhalb der eigentlichen Programme durchgeführt werden. Für BASEMENT erfolgt die Netzerstellung mithilfe des QGIS-Plugins BASEmesh. Für Hydro_AS-2D existieren die beiden gesondert zu erwerbenden Zusatzmodule Flussschlauchgenerator (für die Erstellung des Flussschlauchs) sowie Laser_AS-2D (für die Erstellung des Vorlandnetzes). Grundsätzlich kann in beiden Fällen für die Netzerstellung bzw. -bearbeitung auch zusätzliche Software (bspw. SMS oder Blue Kenue) eingesetzt werden.

Für **BASEMENT** erfolgt die Netzerstellung standardmäßig über das QGIS-Plugin BASEmesh. Es können ausschließlich unstrukturierte Dreiecksnetze erzeugt werden. Es können jedoch auch andere Netze importiert und bearbeitet werden. Die Netzerstellung basiert auf dem frei verfügbaren Netzgenerator TRIANGLE von J. R. Shewchuk. Die Details können (Shewchuck 2005) entnommen werden. In BASEmesh ist keine getrennte Erstellung von Flussschlauch- und Vorlandnetz vorgesehen. Es muss ein Netz über das gesamte Gebiet erstellt werden. Werden als Höheninformation Vermessungspunkte verwendet (bspw. Querprofile für die Abbildung des Flussschlauchs), muss zunächst ein sogenanntes Elevation Mesh erstellt werden. Dabei handelt es sich um ein Zwischenergebnis, welches noch keine Qualitätskriterien berücksichtigt. Hierbei werden die verschiedenen Höhenpunkte trianguliert, um die Höheninformation in eine geometrische Struktur für die spätere Interpolation zu bringen (Vetsch et al. 2018b, 53). Wird als Höheninformation ein DGM verwendet, entfällt dieser Schritt. Die Erzeugung des eigentlichen Berechnungsnetzes erfolgt über das sogenannte Quality Meshing. Bruchkanten müssen hierbei manuell übergeben werden. Standardmäßig wird an jeder Stützstelle einer Bruchkante ein Knoten erstellt, sodass das Netz im Bereich von Bruchkanten automatisch feiner wird. Zusätzlich können sogenannte „Regions“ definiert und Zwangspunkte übergeben werden. Über die Regions können Regionen gleicher Eigenschaften definiert werden. Hierzu müssen Punktdaten (Regionpunkte) übergeben werden. Ein von Bruchkanten umgrenzter Regionpunkt definiert eine Region. Den Regionen können dann verschiedene Attribute (bspw. eine maximale Elementgröße oder eine Material ID) zugeordnet werden. Hierdurch kann also die Netzauflösung zusätzlich beeinflusst werden. Des Weiteren können verschiedene Parameter für die Triangulierung wie bspw. ein minimaler Innenwinkel definiert werden. Zu kleine Innenwinkel können zu kleinen Zeitschritten und damit zu langen Rechenzeiten führen. Das Quality Mesh enthält noch keinerlei Höheninformationen. Diese müssen in einem gesonderten Schritt durch Interpolation hinzugefügt werden. Hierbei kann als Grundlage entweder das erstellte Elevation Mesh oder ein DGM dienen. Das erstellte Netz kann in das 2dm-Format exportiert werden, welches von vielen Netzbearbeitungs- und Visualisierungsprogrammen geöffnet werden kann.

Die Netzgenerierung für **Hydro_AS-2D** findet für Flussschlauch und Vorland getrennt statt. Dafür stehen die Zusatzmodule Flussschlauchgenerator und Laser_AS-2D zur Verfügung.

Die Erstellung des Flussschlauchs mithilfe des Flussschlauchgenerators basiert auf Vermessungsprofilen und Uferlinien. In einem ersten Schritt werden die Höheninformationen aus den Vermessungsprofilen entlang von Stromlinien längs des Flusslaufs zu einem DGM interpoliert (David 2017, 46). Anschließend wird auf Grundlage von Profilsuren und Uferlinien ein Berechnungsnetz erstellt, dem in einem letzten Schritt die Höhen aus dem DGM zugewiesen werden (Nucij 2015, 4). Bei dem erstellten Netz handelt es sich um ein strukturiertes Netz aus Dreiecks- und Viereckselementen. Die Elementkanten sind dabei senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtet.

Zur Generierung des Vorlandnetzes wird das Zusatzmodul Laser_AS-2D eingesetzt. In einem ersten Schritt werden dabei Ausreißerpunkte aus dem zugrundeliegenden DGM herausgefiltert. In einem nächsten Schritt wird versucht, das Gelände über möglichst große Elemente (20 m bis 30 m Kantenlänge) unter Vorgabe einer Höhentoleranz abzubilden. An Stellen, an denen die vorgegebene Höhentoleranz überschritten wird, werden automatisch Zwangspunkte in Form von 3D-Bruchkanten gesetzt (M. Nujic 2006, 5). Die Zwangspunkte erhalten dabei die Höhen aus dem DGM. Hierdurch entsteht ein Netz, welches in Bereichen großer Höhenänderungen automatisch eine höhere Auflösung besitzt. Es können dabei zusätzlich Bereiche definiert werden, in denen eine andere Höhentoleranz gilt (insgesamt können maximal zwei unterschiedliche Höhentoleranzen angegeben werden). Zudem werden manuell weitere Bruchkanten (bspw. aus Vermessungsdaten) hinzugefügt. Das erstellte Netz ist ein unstrukturiertes Dreiecksnetz. Flussschlauch- und Vorlandnetz müssen anschließend miteinander verknüpft werden.

Die Unterschiede zwischen beiden Ansätzen liegen somit zum einen in der Behandlung des Flussschlauchs, für welchen für Hydro_AS-2D ein gesondertes Netz erstellt wird. Die Besonderheit dieses Netzes besteht in seiner Struktur und Ausrichtung senkrecht zur Fließrichtung. Die Höheninformationen werden anhand von Stromlinien entlang des Flussschlauchs interpoliert. Dies ist mit BASEmesh nicht möglich. Zwischen zwei Querprofilen können Höhen nur entlang von geraden Linien interpoliert werden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2.1). Bezüglich des Vorlandnetzes besteht mit Laser_AS-2D die Möglichkeit der automatischen Erkennung von Bruchkanten. In BASEmesh müssen alle Bruchkanten manuell übergeben werden. BASEmesh bietet dafür die Möglichkeit, das Netz durch das Setzen von Regionpunkten bereichsweise beliebig zu verfeinern.

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass sich die hier beschriebenen Optionen lediglich auf die jeweils eigenen Zusatzmodule (BASEmesh bzw. Laser_AS und Flussschlauchgenerator) beziehen. Grundsätzlich kann auch andere Software (bspw. SMS) für die Netzerstellung verwendet werden.

2.5 Zusammenfassung

Hinsichtlich der hydrodynamischen Grundgleichungen gibt es nur wenige Unterschiede zwischen beiden Modellen. Hervorzuheben ist, dass in BASEMENT zwischen verschiedenen Ansätzen zur Definition des Reibungsgefälles gewählt werden kann, während in Hydro_AS-2D ausschließlich der Ansatz nach Manning-Strickler implementiert ist. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt in BASEMENT nach einem expliziten Euler-Verfahren 1. Ordnung, während in Hydro_AS-2D ein exakteres Runge-Kutta-Verfahren 2. Ordnung eingesetzt wird. Die räumliche Diskretisierung basiert in beiden Modellen auf Finite-Volumen-Verfahren. BASEMENT bietet bezüglich der Definition von Randbedingungen einige zusätzliche Optionen im Vergleich zu Hydro_AS-2D, besitzt allerdings die Einschränkung, dass diese nur auf dem Modellrand definiert werden können und damit bspw. keine Zuflüsse innerhalb des Modellgebiets integriert werden können. Hinsichtlich der internen Randbedingungen sowie der Abbildung von Hochwasserschutzmaßnahmen bietet Hydro_AS-2D mehr Möglichkeiten. Insbesondere bei der Abbildung durchströmter Bauwerke sind hier mehr Optionen gegeben. In Basement sind derzeit einige durchströmte Bauwerke wie Durchlässe oder überströmte Brücken nur eingeschränkt simulierbar. Die Netzerstellung mithilfe der jeweiligen Preprocessing-Werkzeuge unterscheidet sich durch die getrennte Erstellung von Flussschlauch- und Vorlandnetz für Hydro_AS-2D, während für BASEMENT ein Netz für das gesamte Gebiet erstellt wird. Insbesondere bei der Abbildung des Flussschlauchs weist BASEmesh momentan noch Defizite auf im direkten Vergleich zum Werkzeug Flussschlauchgenerator.

3 Vergleichende Modellanwendung

Für eine umfassende Evaluation von BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D wurden beide Programme auf ein konkretes Fallbeispiel aus der Praxis angewendet. Für das Projektgebiet lag zu Beginn der Arbeit bereits ein Hydro_AS-2D-Modell vor, welches von der SYDRO Consult GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Auf Grundlage des bestehenden Hydro_AS-2D-Modells wurde ein Modell mit BASEMENT aufgesetzt. Die Erstellung des BASEMENT-Modells, sowie der Vergleich der Ergebnisse wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Darüber hinaus wurden beide Programme auf zwei aus der Literatur bekannte Test-Cases angewendet, um zusätzlich einen Vergleich der Genauigkeit der Lösungsverfahren zu ermöglichen. Es liegt hierfür eine Referenzlösung aus der Literatur vor.

3.1 Beschreibung des Modellgebiets und der Datengrundlage

3.1.1 Beschreibung des gewählten Gewässerabschnitts

Das bestehende Hydro_AS-2D-Modell wurde zur Ausweisung von Überschwemmungsflächen (Hochwassergefahrenkarten) entlang der Rur erstellt. Es umfasst den Verlauf der Rur von der Ortslage Jülich in Nordrhein-Westfalen bis zum niederländischen Vlodrop. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur ein Teilabschnitt des Modellgebiets untersucht. Ursprünglich sollte der Abschnitt vom Pegel Linnich (Rur-km 47+585) bis hin zum Pegel Stah (Rur-km 25+783) betrachtet werden, da für beide Pegel umfassende Aufzeichnungen vorlagen. Geplant war, ein Hochwasserereignis vom Januar 2011 zu simulieren. Im Laufe der Modellierungsarbeiten stellte sich jedoch heraus, dass für diese Gebietsgröße und für die Dauer des Hochwasserereignisses die Rechenzeiten in BASEMENT sehr lang wurden. Es wurde daher eine für den Rahmen dieser Arbeit praktikablere Variante gewählt. Das Gebiet wurde deutlich verkleinert und erstreckt sich letztendlich von der Autobahnbrücke A46 bei Hückelhoven bis zum Pegel Stah und umfasst ca. 10 Flusskilometer. Statt einer instationären Simulation des Hochwasserereignisses wurden mehrere stationäre Berechnungen mit unterschiedlichen Abflüssen durchgeführt. Entlang des gewählten Abschnitts befinden sich sowohl landwirtschaftlich genutzte Flächen als auch bebaute Flächen. Es existieren zudem einige Bauwerke wie Brücken, Wehre und Durchlässe entlang des Abschnitts. Im Norden des Modellgebiets mündet ein Nebengewässer, die Wurm, in die Rur. Aufgrund der mit Hydro_AS-2D ermittelten Überschwemmungsflächen ist außerdem gewährleistet, dass es im Modellgebiet auch tatsächlich zu Ausuferungen kommt. Durch die heterogene Landnutzung und die Vielzahl von Bauwerken kann also davon ausgegangen werden, dass das Modell eine ausreichende Komplexität für eine aussagekräftige Evaluation aufweist.

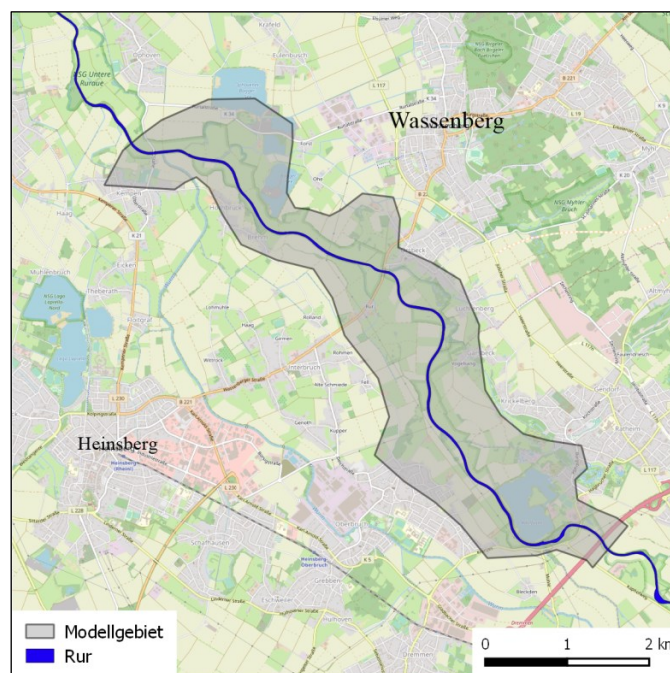


Abbildung 3-1: Modellgebiet

3.1.2 Beschreibung der zur Verfügung gestellten Daten

Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung wurden von der SYDRO Consult GmbH sowie der Bezirksregierung Köln folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Diverse Bruchkanten im Shape-Format
- Ein digitales Geländemodell des Modellgebiets
- Flächendeckende Luftbilder des Modellgebiets
- Kartenhintergrund des Modellgebiets
- Materialbelegung im Shape-Format
- Pegelstandorte im Shape-Format
- Pegelaufzeichnungen
- Daten aus der terrestrischen Vermessung im Shape-Format sowie eine Fotodokumentation
- Das bestehende Hydro_AS-2D-Modell

Die Bruchkanten umfassen 2D-Bruchkanten (wie Dammkronen und Straßen), die aus dem DGM übernommen wurden, sowie 3D-Bruchkanten aus der terrestrischen Vermessung. Zusätzlich umfassen sie Gebäude, Gräben, Uferlinien und die Geometrie von Widerlagern und Brückenpfeilern. All diese verschiedenen Bruchkantentypen wurden in separaten Shape-Files übergeben.

3.2 Erstellung des BASEMENT-Modells

3.2.1 Preprocessing

Nach der Auswahl des Gewässerabschnitts und der Sichtung der zur Verfügung gestellten Daten wurde mit dem Preprocessing des BASEMENT-Modells begonnen. Das Preprocessing umfasst im Wesentlichen die Erstellung des Berechnungsnetzes. Die zugehörigen Arbeitsschritte wurden unter Anwendung des QGIS-Plugins BASEmesh durchgeführt. Die Netzerstellung in BASEmesh läuft in mehreren Schritten ab. Es findet keine Trennung zwischen Flussschlauch und Vorland statt, sondern es wird ein Netz für das gesamte Gebiet erzeugt. Zum einen wird ein sogenanntes Quality Mesh erstellt, welches in Ausprägung und Detailgrad dem späteren Berechnungsnetz entspricht, jedoch noch keine Höheninformationen beinhaltet. Basieren die Höheninformationen auf Punktdaten (bspw. Vermessungsprofilen), muss zusätzlich ein separates Netz, das sogenannte Elevation Mesh, erstellt werden. Dieses erfüllt keinerlei Qualitätskriterien, sondern dient lediglich dazu, die Höheninformationen durch Triangulierung in eine geometrische Struktur für die spätere Interpolation zu bringen. Wird ein DGM als Höheninformation genutzt, entfällt dieser Schritt. Schließlich müssen die Höheninformationen aus dem Elevation Mesh oder dem DGM über das Quality Mesh interpoliert werden.

Für die Modellierung des Untersuchungsgebiets musste vom vorgesehenen Workflow abgewichen werden, da insbesondere die Erstellung des Elevation Meshs für das Modellgebiet mit den derzeitigen Optionen von BASEmesh nicht möglich war (siehe Abschnitt Elevation Mesh). Die Höheninformationen wurden daher zum Teil aus dem bestehenden Hydro_AS-2D-Modell übernommen.

Aufbereitung der Daten

Vor der eigentlichen Netzerstellung mussten die Daten in ein für BASEmesh kompatibles Format gebracht werden. Als erster Schritt des Preprocessings steht somit die Aufbereitung der zur Verfügung gestellten Daten.

Das Hydro_AS-2D-Netz umfasst insgesamt ca. 2 Mio. Elemente. Der Einsatz von BASEmesh ist jedoch nur bis zu einer Anzahl von ca. 500.000 Elementen praktikabel. Gemäß des in BASEmesh verwendeten Triangulierungsverfahrens wird das Netz umso feiner, je mehr Bruchkanten im Gebiet vorhanden sind und je enger diese beieinander liegen (siehe Abbildung 3-2).

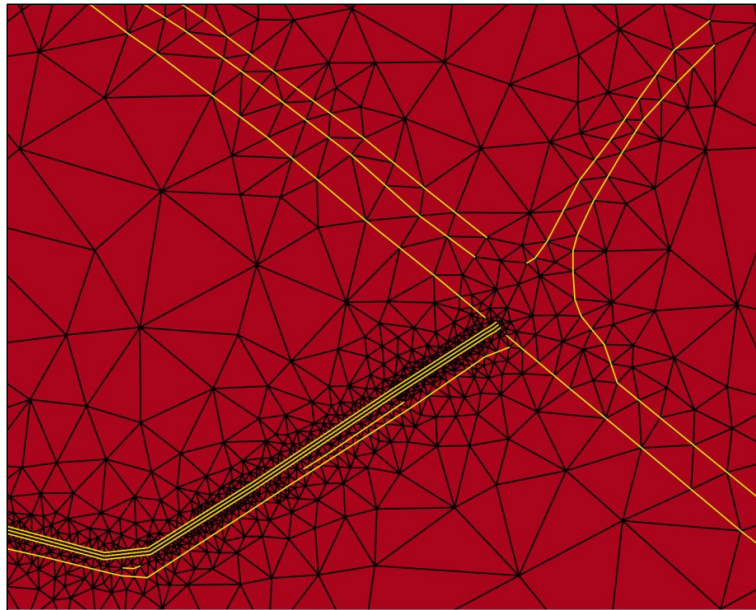


Abbildung 3-2: Feines Netz bei eng beieinander liegenden Bruchkanten

Daher musste zunächst der Detailgrad der Bruchkanten reduziert werden, was gleichzeitig eine erste Abweichung zum bestehenden Modell darstellt. Um dies zu erreichen, wurde ein von der SYDRO Consult GmbH zur Verfügung gestelltes QGIS-Werkzeug genutzt. Dabei kann ein Pufferbereich zwischen den verschiedenen Bruchkanten definiert werden. Bruchkanten, die enger beieinander liegen, werden, unter Beachtung zuvor definierter Prioritäten der Bruchkanten untereinander, entsprechend gelöscht. 3D-Bruchkanten aus der terrestrischen Vermessung haben bspw. eine höhere Priorität als die 2D-Bruchkanten aus dem DGM. Dieses Verfahren prüft allerdings nur den Pufferbereich zwischen verschiedenen Bruchkantentypen (bspw. zwischen 3D- und 2D-Bruchkanten). Für Bruchkanten desselben Typs wird der Pufferbereich nicht geprüft. Daher wurden zusätzlich manuell einige nicht zwingend erforderliche 2D-Bruchkanten entfernt. Dabei wurden insbesondere Bruchkanten entlang von Straßen und Feldwegen, an denen keine signifikanten Höhenänderungen vorlagen, ausgewählt. Dies wurde anhand des DGMs überprüft. Um die Zahl der Elemente noch weiter reduzieren zu können, wurden zudem die Gebäudebruchkanten vereinfacht. Hierbei wurde zum einen (mit Hilfe des QGIS-Werkzeugs „Geometrie vereinfachen“) die Geometrie der Gebäude vereinfacht (siehe Abbildung 3-3). Zum anderen wurden kleine Gebäude mit einer Fläche geringer als 100 m² entfernt. Des Weiteren wurde bei den Bruchkanten der Gräben die Anzahl der Stützstellen reduziert. Da bei der Triangulierung in BASEmesh an jeder Stützstelle ein Netzknoten gesetzt wird, kann hierdurch ebenfalls die Anzahl der Elemente verringert werden.

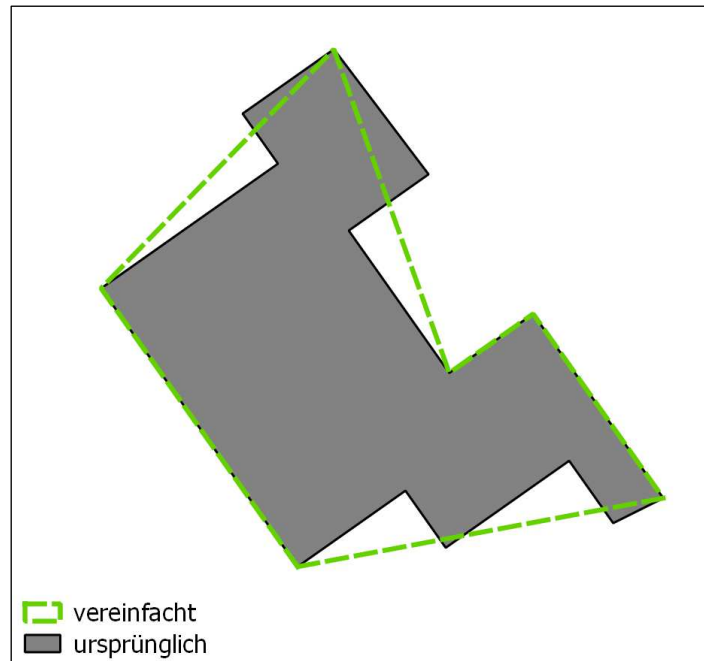


Abbildung 3-3: Vereinfachung der Gebäudegeometrie

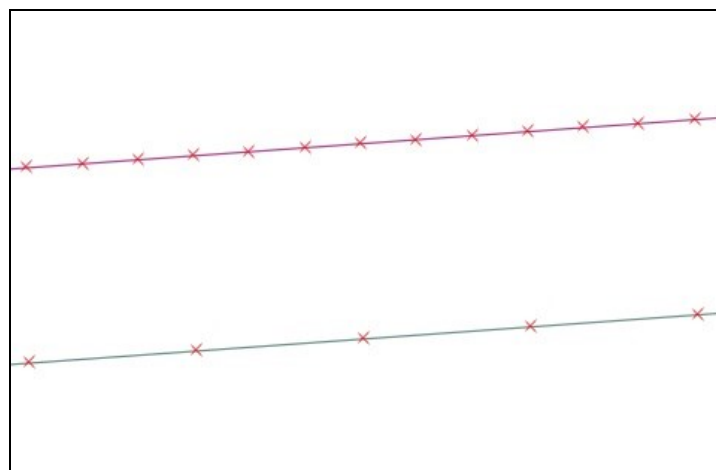


Abbildung 3-4: Reduktion der Stützstellen der Grabenbruchkanten

Quality Mesh

Nach der Aufbereitung der Bruchkanten wurde mit der Erstellung des Quality Meshs begonnen. Für die Erstellung des Quality Meshs mit BASEmesh werden folgende Dateien benötigt:

- Modellgrenzen als Polygon-Shapefile
- Bruchkanten als Linien-Shapefile (in einem gemeinsamen Layer)
- Regionen gleicher Eigenschaften (Regionpunkte) als Punkte-Shapefile

Zunächst wurden die Modellgrenzen definiert. Die Längsausdehnung ergibt sich durch die Lage der Autobahnbrücke A46 und des Pegels Stah. Die Ausdehnung am nördlichen Rand geht ca. 300 m über den Pegel hinaus, um bei der späteren Simulation Randeffekte zu minimieren. Anschließend wurde die genaue seitliche Ausdehnung des Modells

festgelegt. Um auch hierdurch die Anzahl der später erzeugten Elemente möglichst gering zu halten, wurden die mit Hydro_AS-2D ermittelten Überschwemmungsflächen (für den höchsten betrachteten Abfluss) als Orientierung zu Grunde gelegt. Um keine überflüssigen Elemente zu erzeugen, wurden die Modellgrenzen also relativ nah an die Grenzen der Überschwemmungsflächen gelegt. Da die Ausdehnung der mit BASEMENT ermittelten Überschwemmungsflächen jedoch theoretisch darüber hinausgehen kann, wurde noch ein ausreichender Pufferbereich beibehalten (siehe Abbildung 3-5).

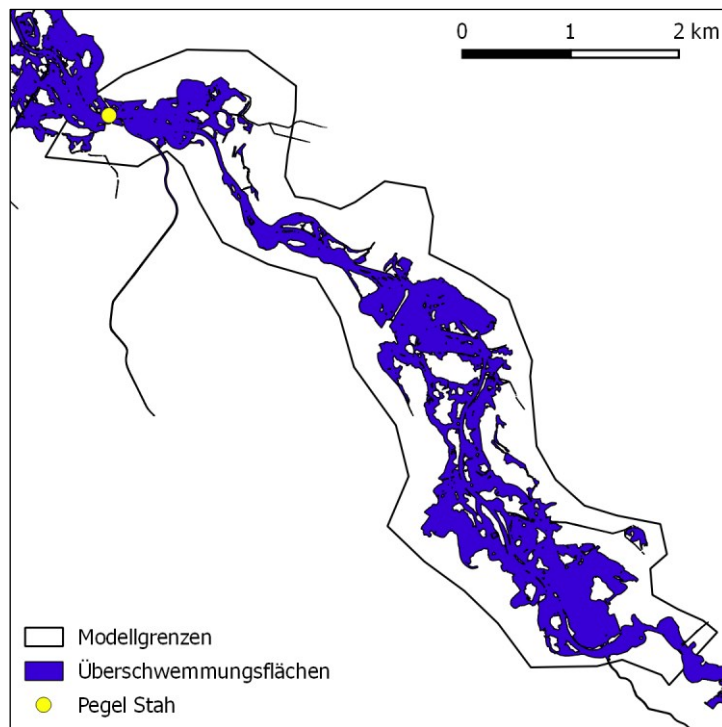


Abbildung 3-5: Abgrenzung der Modellausdehnung anhand von Überschwemmungsflächen

Im nächsten Schritt wurden die zuvor aufbereiteten Bruchkanten in einen Layer zusammengeführt. Neben 2D- und 3D-Bruchkanten, Gräben, Gebäuden und Brückenwiderlagern musste auch die Abgrenzung des Flussschlauchs (Uferlinien) als Bruchkanten übergeben werden. Da dieser mit BASEmesh nicht erzeugt werden konnte (siehe Abschnitt Elevation Mesh), wurde die Abgrenzung aus dem bestehenden Hydro_AS-2D-Modell übernommen.

Zur Definition von Regionen gleicher Eigenschaften werden in BASEmesh sogenannte „Regions“ erstellt. Hierzu wird ein Punkt in einem von Bruchkanten abgegrenzten Bereich gesetzt. Dem Punkt können drei Attribute zugewiesen werden, um die jeweilige Region zu definieren. Zum einen das Attribut „Maximum Area“, welches die maximale Fläche eines Elementes festlegt. Hierdurch kann also die lokale Feinheit des Netzes beeinflusst werden. Durch das Attribut „Material Index“ kann die Materialbelegung definiert werden. Über das Attribut „hole“ kann eine Region aus dem Netz heraus geschnitten werden. Für die Erstellung des Modells wurde im Bereich des Flussschlauchs, welcher ja durch die entsprechenden Bruchkanten abgegrenzt ist, ein Regionpunkt mit einer Maximum Area von 5 m² gesetzt. Um bei der späteren Interpolation der Höhenin-

formationen Ungenauigkeiten möglichst gering zu halten, war es erforderlich, eine sehr feine Netzauflösung innerhalb des Flussschlauchs zu wählen. Auf der anderen Seite durfte die Auflösung nicht zu fein gewählt werden, um die praktikable Obergrenze von 500.000 Elementen nicht zu überschreiten. Des Weiteren wurden innerhalb aller Gebäudeflächen sowie innerhalb aller Brückenwiderlager- und -pfeilergeometrien Regionpunkte mit dem Attribut `hole=1` gesetzt. Hierdurch werden die entsprechenden Regionen aus dem Netz herausgeschnitten, um zu berücksichtigen, dass diese nicht durchströmt werden können. Das Attribut „Material Index“ wurde nicht definiert, da die Material ID auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten Landnutzungsverteilung später separat zugewiesen wurde.

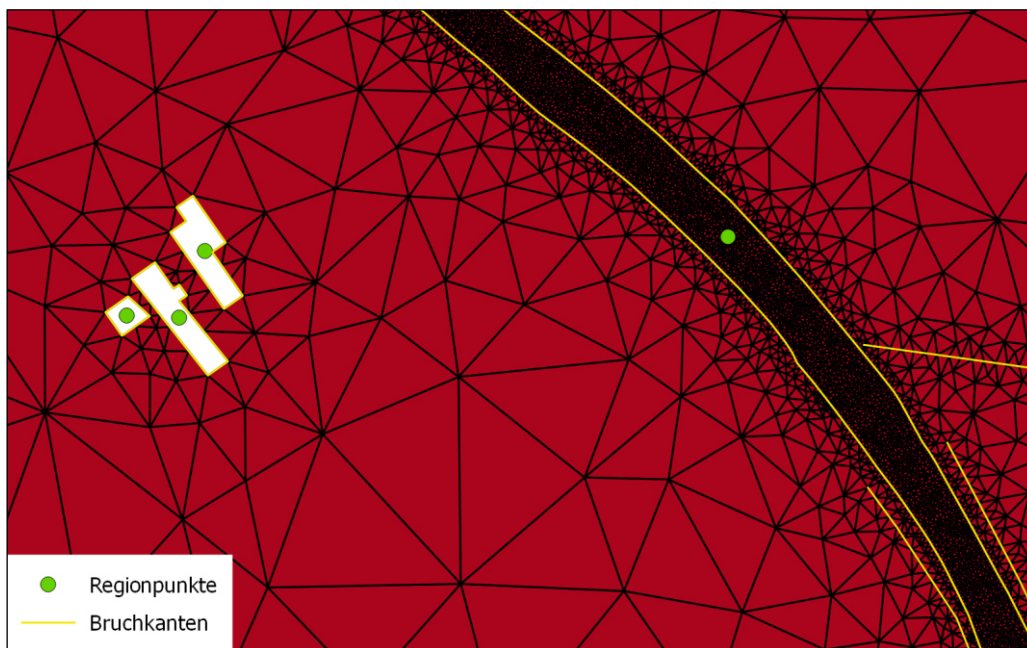


Abbildung 3-6: Setzen von Regionpunkten (links: Herausschneiden der Gebäudeflächen über das Attribut `hole=1`, rechts: Definition der Feinheit des Flussschlauchnetzes über das Attribut „Maximum Area=5 m²“)

Die Brücken im Modellgebiet werden weitestgehend durch den reduzierten Fließquerschnitt infolge der Brückenwiderlager und -pfeiler abgebildet. Diese Herangehensweise erscheint nach Analyse der mit Hydro_AS-2D ermittelten Wasserspiegelauslenkung plausibel. So wurde bei den untersuchten Abflüssen nur eine Brücke im Modellgebiet eingestaut. Alle anderen Brücken werden nicht eingestaut, sodass die hydraulischen Verhältnisse allein durch die Querschnittsverengung abgebildet werden können. Die eingestaute Brücke wurde hingegen als interne Randbedingung eingebunden. Hierzu mussten zunächst noch zusätzliche Bruchkanten erstellt werden. BASEMENT benötigt zur Einbindung solcher interner Randbedingungen eine identische Anzahl von Knoten auf der Zu- und Abstromseite. Für die entsprechenden Bruchkanten wird daher ein zusätzliches Attribut „ncells“ definiert, welches die Anzahl der Knoten festlegt, die entlang der entsprechenden Bruchkante mit BASEmesh erzeugt werden. Innerhalb der internen Randbedingung muss ein Regionpunkt mit dem Attribut `hole=1` gesetzt werden, um die

Fläche aus dem Berechnungsnetz herauszuschneiden, damit die darunterliegenden Elemente nicht doppelt in die Simulation eingehen.

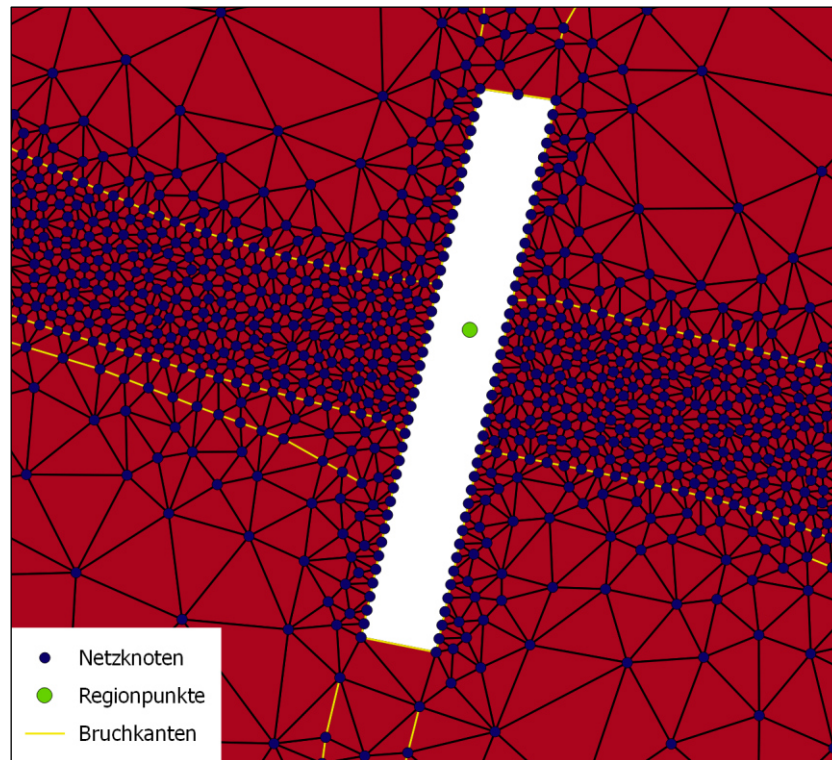


Abbildung 3-7: Einbinden einer Brücke als interne Randbedingung mit identischer Knotenanzahl auf Zu- und Abstromseite

In einem letzten Schritt musste den einzelnen Elementen eine Material ID zugewiesen werden. Über diese ID kann jedem Element später in BASEMENT eine eigene Rauheit zugeordnet werden. Für die Zuweisung der Material ID wurde das zur Verfügung gestellte Landnutzung-Shapefile zugrunde gelegt. Dieses enthält flächenhafte Informationen zur Landnutzung und der zugehörigen Rauheit (kst-Werte). Entsprechend wurde für jeden Landnutzungstyp eine Material ID vergeben und den darunter liegenden Elementen zugewiesen. Die Umsetzung erfolgte direkt in QGIS. Mit BASEmesh kann zwar die Material ID auch direkt über Regionpunkte definiert werden, jedoch müssten dazu die Abgrenzungen der verschiedenen Landnutzungen als Bruchkanten in das Netz integriert werden. Dies wäre im betrachteten Fall nicht praktikabel gewesen. Stattdessen mussten mit verschiedenen QGIS-Werkzeugen die Elemente innerhalb der einzelnen Landnutzungsflächen selektiert werden. Im Anschluss wurde den selektierten Elementen über den QGIS-Feldrechner eine neue Material ID zugewiesen. Dieser Vorgang musste für alle Landnutzungen einzeln durchgeführt werden. An Stellen, an denen das Netz eine geringe Auflösung besitzt, wird die Abbildung der Flächen entsprechend ungenauer (siehe Abbildung 3-8). Die genaue Verteilung der Landnutzung und die zugehörigen Rauheitsbeiwerte sind Anhang A.2 zu entnehmen.



Abbildung 3-8: Zuweisung der Material ID (oben: tatsächliche Verteilung der Landnutzung; unten: Verteilung der Landnutzung im Modell)

Elevation Mesh

Das Quality Mesh enthält noch keinerlei Höheninformationen. Um diese hinzuzufügen, gibt es in BASEmesh zwei Möglichkeiten. Liegen Höhenpunkte aus Vermessungsdaten vor, kann aus diesen ein sogenanntes Elevation Mesh erstellt werden. Alternativ kann die Höheninformation aus einem DGM übernommen und über das Quality Mesh interpoliert werden. Die Höheninformationen aus einem DGM werden jedoch aus Laserscans gewonnen. Die Gewässersohle kann bei solchen Verfahren nicht erfasst werden, da der Laserimpuls an der Gewässeroberfläche reflektiert wird (Mandlbürger et al. 2009, 93). Somit sind für die exakte Abbildung des Flussschlauchs Höheninformationen aus Vermessungsdaten erforderlich. Für die Abbildung des Vorlands kann dann die Höheninformation wiederum aus einem DGM genommen werden.

Für das Modellgebiet wurden sowohl ein DGM (1m Auflösung) als auch Vermessungsdaten in Form von Querprofilen zur Verfügung gestellt. Es galt also, ein Elevation Mesh für den Flussschlauch zu erstellen. Im nächsten Schritt sollten dann über die Knoten innerhalb des Flussschlauchs die Höheninformationen aus dem Elevation Mesh und über die Knoten außerhalb des Flussschlauchs die Höheninformationen aus dem DGM interpoliert werden.

Die Querprofile wurden in regelmäßigen Abständen (zwischen ca. 50 m bis 100 m) entlang des Flussabschnitts aufgenommen. Im Bereich von Querbauwerken wurden die Profile verdichtet. Zur Erstellung eines Elevation Meshs in BASEmesh werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- Modellgrenzen als Polygon-Shapefile
- Höhenpunkte aus der Vermessung als Punkt-Shapefile
- Bruchkanten als Linien-Shapefile (in einem gemeinsamen Layer)

Eine Voraussetzung ist dabei, dass alle Stützpunkte des Modellrandes sowie der Bruchkanten auf einem Höhenpunkt liegen müssen (Vetsch et al. 2018b, 53). Um den Verlauf des Flusses möglichst genau abzubilden, müsste es eine Möglichkeit geben, die Höheninformationen zwischen zwei Querprofilen entlang von Stromlinien zu interpolieren. Andernfalls besteht nur die Möglichkeit, die Querprofile durch gerade Linien zu verbinden. Dadurch kann der Verlauf des Flusses jedoch nicht abgebildet werden. Dies stellt eine starke Einschränkung dar. Ein Elevation Mesh kann somit nur für weitestgehend gerade Abschnitte erstellt werden. Für das Modellgebiet trifft dies jedoch nicht zu. Auch wenn die Querprofile in regelmäßigen Abständen erfasst wurden, sind die Abschnitte dazwischen keineswegs immer gerade. Aus Abbildung 3-9 wird ersichtlich, dass auf diese Weise kein verwendbares Elevation Mesh erzeugt werden konnte. Dies könnte nur unter Hinzunahme externer Software (CAD-Programme, GIS-Werkzeuge) erreicht werden. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch auf der Evaluation von BASEMENT bzw. BASEmesh liegt, wurde auf diesen Schritt verzichtet.

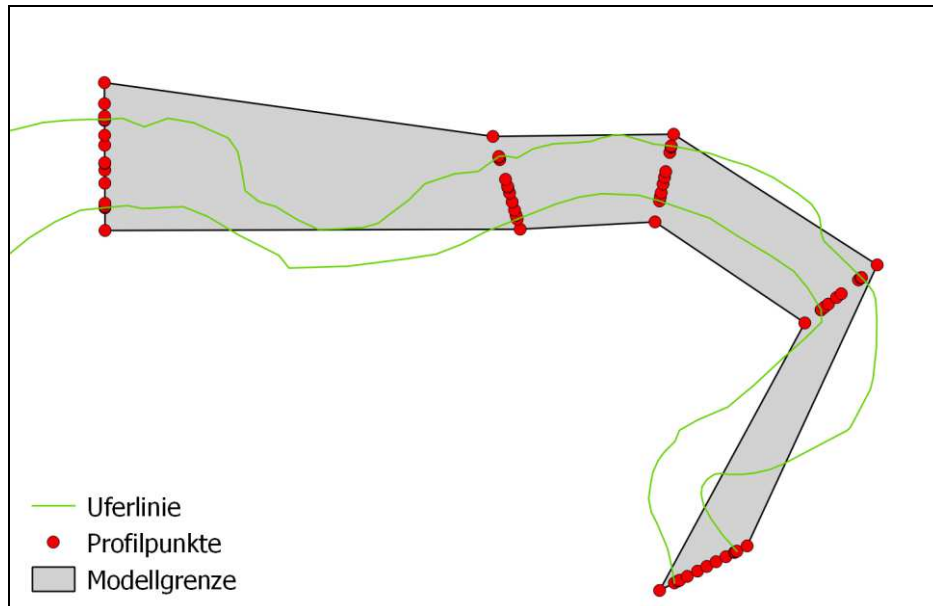


Abbildung 3-9: Unzureichende Abbildung des Gewässerverlaufs

Stattdessen wurden die Höheninformationen aus dem bestehenden Hydro_AS-2D-Netz verwendet. Dazu wurde das bestehende Flussschlauchnetz in ein Raster mit einer Auflösung von 0,35 m konvertiert. Dieses Raster konnte anschließend für die Interpolation verwendet werden.

Interpolation

In diesem letzten Schritt der Netzerstellung werden dem Quality Mesh die Höheninformationen zugewiesen. Für das Modellgebiet wurde die Interpolation zweimal durchgeführt. Einmal für die Knoten innerhalb des Flussschlauchs unter Verwendung der im vorherigen Schritt erstellten Raster-Dateien und einmal für die Knoten außerhalb des Flussschlauchs unter Verwendung des DGM. Dazu mussten die entsprechenden Knoten unter Verwendung verschiedener QGIS-Werkzeuge zunächst selektiert und getrennt werden. Nach der Interpolation mussten sie wieder zusammengeführt werden. Bei der Interpolation wird jedem Knoten des Quality Mesh die Höheninformation der darunter liegenden Rasterzelle zugewiesen. In einem letzten Schritt wurde das Netz ins 2dm-Format exportiert.

Vergleich der Netze

Beim Vergleich zwischen dem mit BASEmesh erstellten und dem bestehenden Netz fällt auf, dass ersteres an einigen Stellen deutlich gröber aufgelöst ist. Dies liegt zum einen an der im Vorfeld durchgeführten Reduktion der Bruchkanten. Zum anderen verfügt das Modul Laser_AS, mit welchem das Vorlandnetz für Hydro_AS-2D erstellt wurde, über die Möglichkeit, weitere Bruchkanten automatisch aus dem DGM zu erkennen und in das Netz einzubinden. Über eine solche Möglichkeit verfügt BASEmesh nicht. Es werden nur die Strukturen als Bruchkanten abgebildet, die zuvor übergeben wurden. Daraus ergibt sich an einigen Stellen eine ungenauere Geländeauflösung (siehe Abbildung 3-10).

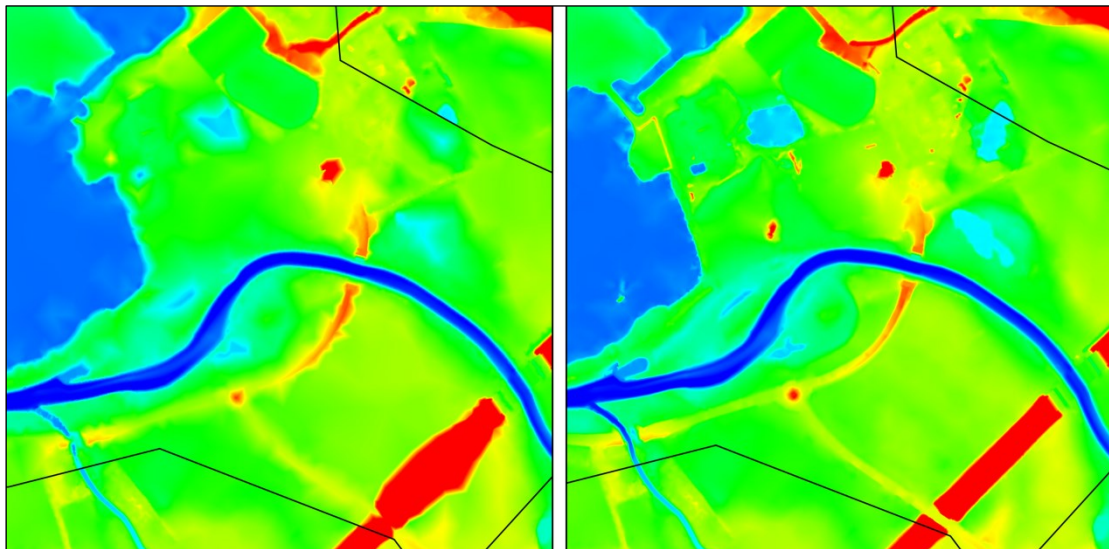


Abbildung 3-10: Vergleich der Geländeauflösung (links BASEmesh, rechts Laser_AS)

Insbesondere die Grabenstrukturen im Vorland mussten noch einmal angepasst werden, indem die Zahl der Stützpunkte wieder etwas erhöht wurde. Auch die Auflösung des Flussschlauchs ist etwas unschärfer als im bestehenden Netz. Dies liegt unter anderem daran, dass BASEmesh ausschließlich unstrukturierte Netze aus Dreieckselementen erstellt. Der Flussschlauchgenerator hingegen erstellt ein strukturiertes Netz aus Dreiecks-

und Viereckselementen. Hierdurch kann der Flussschlauch schärfer vom Vorland abgegrenzt werden, da die Höheninterpolation ja entlang der vorgegebenen Struktur der Elemente erfolgt (siehe Abbildung 3-11).

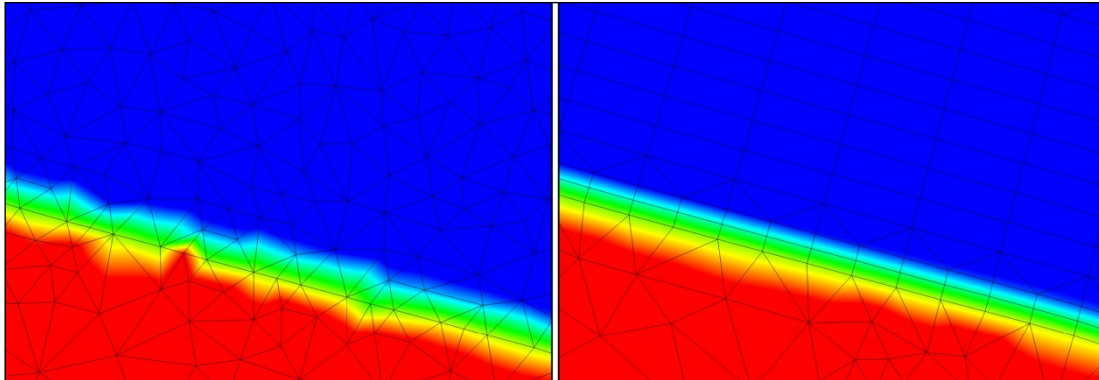


Abbildung 3-11: Abgrenzung des Flussschlauchs (links BASEmesh, rechts Flussschlauch-generator)

In Abbildung 3-12 ist die absolute Höhendifferenz zwischen beiden Modellen dargestellt. Innerhalb des Flussschlauchs sind die Abweichungen erwartungsgemäß gering. Im Vorland werden an einigen Stellen Höhendifferenzen von über 1 m erreicht.

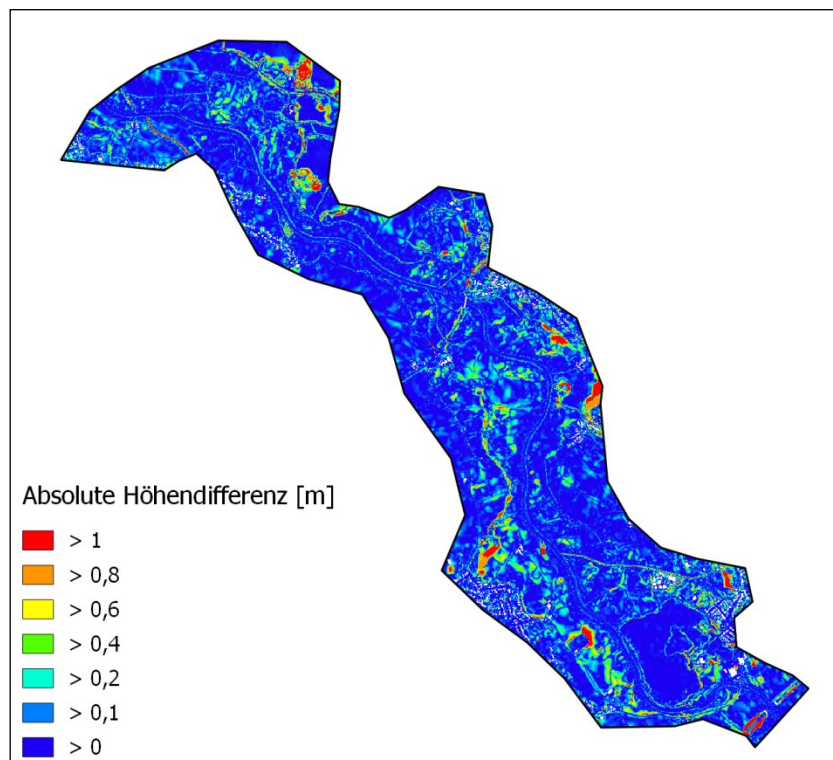


Abbildung 3-12: Absolute Höhendifferenz zwischen beiden Geländemodellen

Bei näherer Betrachtung beider Netze an solchen Stellen mit großer Abweichung fällt erneut auf, dass hier in Laser_AS zusätzliche Bruchkanten erkannt wurden (siehe Abbildung 3-13).

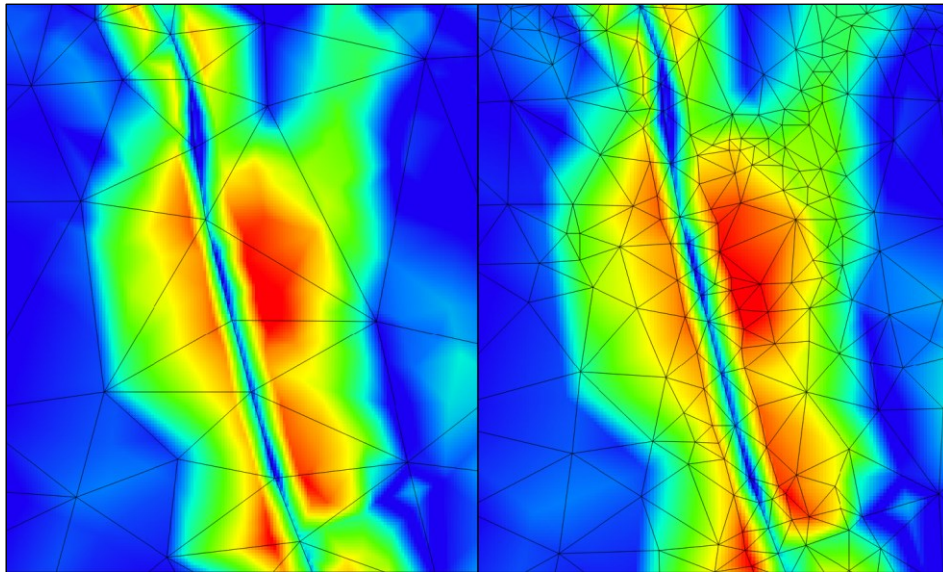


Abbildung 3-13: Höhendifferenzen infolge unterschiedlicher Netzauflösung (links BASEmesh, rechts Laser_AS)

Aufgrund der Limitation von ca. 500.000 Elementen sind für ein so großes Modellgebiet Ungenauigkeiten und Vereinfachungen unumgänglich. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Netz dennoch eine ausreichende Genauigkeit für aussagekräftige Berechnungen besitzt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass das Netz im Laufe des Processings noch mehrmals angepasst wurde, um die Lauffähigkeit des Modells zu optimieren.

3.2.2 Durchführung der Berechnungen

Zur Evaluation von BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D wurden für das Modellgebiet mehrere Simulationsläufe mit verschiedenen stationären Abflüssen durchgeführt. Daraufhin wurden die Wasserspiegelauslenkungen am Pegel Stah sowie die ermittelten Überschwemmungsflächen verglichen. Die Abflüsse wurden so ausgewählt, dass das gesamte Spektrum eines Hochwasserereignisses vom Januar 2011 abgedeckt ist. Für den Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde zudem eine Sensitivitätsanalyse einschließlich Kalibrierung durchgeführt. In Tabelle 3-1 sind die verschiedenen Simulationsläufe aufgeführt.

Tabelle 3-1: Simulationsläufe

Simulationslauf	Abfluss [m^3/s]
S1	10
S2	60
S3	100
S4	150

Bevor eine Simulation gestartet werden kann, muss in BASEMENT der sogenannte Command-File definiert werden. In einer Baumstruktur können hier die gewünschten

Blöcke hinzugeschaltet und deren Parameter eingestellt werden. An dieser Stelle soll nur auf die für diese Arbeit relevanten Blöcke und Module eingegangen werden. BASEMENT bietet jedoch noch zahlreiche weitere Möglichkeiten (z.B. Sedimenttransportsimulationen, 1D-Simulationen, Modellkopplungen).

Die Baumstruktur des Command-Files erfordert für die durchzuführenden Simulationen folgende Einträge:

- **PROJECT**
- **DOMAIN**
 - PARALLEL
 - PHYSICAL PROPERTIES
 - BASEPLANE_2D
 - Geometry
 - *Stringdef (Inlet)*
 - *Stringdef (Outlet)*
 - *Stringdef (Gate_Upstream)*
 - *Stringdef (Gate_Downstream)*
 - Hydraulics
 - *Parameter*
 - *Friction*
 - *Boundary (Inlet)*
 - *Boundary (Outlet)*
 - *Boundary (Gate)*
 - *Initial*
 - Timestep
 - Output
 - Special Outputs

Unter „PROJECT“ werden allgemeine Projektdaten wie Titel und Datum eingegeben. Im übergeordneten Block „DOMAIN“ werden sämtliche modellspezifischen Module und Parameter definiert. Im Block „PARALLEL“ wird die Anzahl der Prozessorkerne, die zur Simulation genutzt werden sollen, ausgewählt. Im Block „PHYSICAL PROPERTIES“ werden die zugrundeliegenden physikalischen Eigenschaften (Viskosität, Erdbeschleunigung etc.) definiert. Der Block BASEPLANE_2D umfasst alle restlichen Untermodule und Parameter, da in diesem Fall ausschließlich 2D-Simulationen durchgeführt wurden. Im untergeordneten Block „Geometry“ muss das zugrundeliegende Berechnungsnetz eingeladen und anhand sogenannter „Stringdefs“ die genaue Lage der Randbedingungen im Netz definiert werden. Im vorliegenden Fall umfassen die Randbedingungen nur Zulauf und Auslauf sowie die als interne Randbedingung (Typ Gate) eingebundene Brücke. Im Block „Hydraulics“ werden sämtliche hydraulischen Parameter definiert. Diese umfassen unter anderem die minimale Wassertiefe und den gewählten Lösungsalgorithmus. Für die obigen Simulationen wurde der approximative HLLC-Riemann-Löser verwendet. Des Weiteren kann unter „Friction“ die Rauheit definiert werden. Es kann

zwischen verschiedenen Ansätzen gewählt werden (bspw. Chezy, Darcy oder Strickler). Die Zuweisung der verschiedenen Rauheiten erfolgt über die Material ID, indem zwei Listen übergeben werden (eine für die Material ID und eine für die entsprechenden Rauheiten). Für die aufgeführten Simulationen wurde die Rauheit (k_{st} -Werte) des kalibrierten Hydro_AS-2D-Modells übernommen. Nur für den Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde eine separate Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung unter Variation der Rauheit durchgeführt. Durch Hinzuschalten eines „Boundary“-Blocks können die hydraulischen Parameter einer Randbedingung eingestellt werden. Die Zulauftrandbedingung wurde als Typ „hydrograph“ durch Übergabe einer Ganglinie definiert. Zudem muss eine Neigung definiert werden, aus der, unter Annahme von Normalabfluss, die Wassertiefe berechnet wird. Für die Auslauftrandbedingung wurde als Typ „hq-relation“ gewählt. Auch hier muss eine Neigung definiert werden, um die Wasserstands-Abfluss-Beziehung unter Normalabflussbedingungen berechnen zu können. Schließlich wird zum Abbilden der eingestauten Brücke eine interne Randbedingung vom Typ „Gate“ definiert. Hierbei wird eine Textdatei mit Informationen zur Öffnungshöhe über die Zeit übergeben (in diesem Fall konstant). Für alle Randbedingungen müssen außerdem die unter „Geometry“ erstellten „Stringdefs“ übergeben werden. Unter „Initial“ können schließlich die Anfangsbedingungen gewählt werden. In diesem Fall wurden sämtliche Berechnungen im trockenen Anfangszustand gestartet. Im Block „TIMESTEP“ werden Startzeit, Laufzeit sowie die CFL-Zahl festgelegt. Über letztere kann der minimale Zeitschritt beeinflusst werden (siehe Abschnitt 2.2.1). Letztendlich können unter „OUTPUT“ verschiedene Ausgabedateien gewählt werden. Die Ergebnisdateien für die Wassertiefe oder die Geschwindigkeiten können dann bspw. in QGIS-Crayfish eingeladen werden. Darüber hinaus können viele weitere Ausgabedateien erstellt werden. Durch Hinzufügen eines Outputs vom Typ „balance“ wird bspw. eine Textdatei ausgegeben, in der für jeden Zeitschritt das limitierende Element aufgeführt ist. Dadurch können kritische Stellen im Netz identifiziert werden.

Nach den ersten Berechnungen konnten anhand des balance-Outputs noch einige Schwachstellen im Netz entdeckt und bereinigt werden. Dies war notwendig, da bedingt durch die kritischen Elemente der Zeitschritt so klein wurde, dass die Simulation praktisch nicht mehr lauffähig war. Die kritischen Elemente resultierten aus zu dicht beieinander liegenden Bruchkanten oder aus Bruchkanten mit zu dichten Stützpunkten. In Abbildung 3-14 ist ein Extremfall dargestellt. So führten zwei sehr dicht nebeneinander liegende Bruchkanten im Flussschlauch (vermutlich ein Verarbeitungsfehler) zur Erzeugung von Elementen mit einer Kantenlänge im Millimeterbereich. Auf diese Weise wurden noch einige weitere kritische Stellen im Flussschlauch identifiziert und bereinigt. An manchen Stellen musste durch Reduktion der Stützpunkte die Geometrie minimal vereinfacht werden.

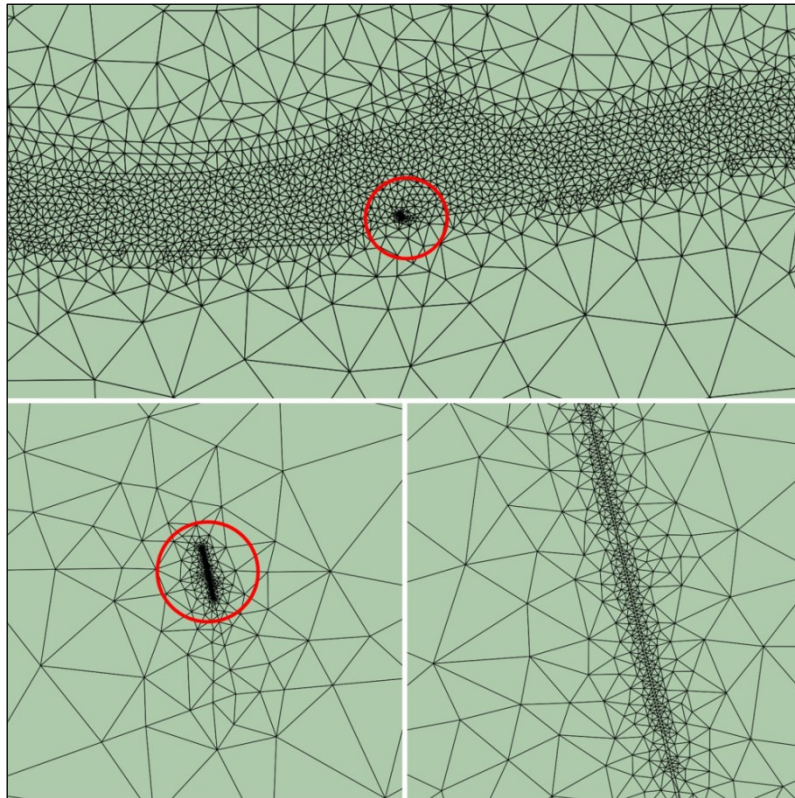


Abbildung 3-14: Elemente mit einer Kantenlänge im Millimeterbereich

3.3 Vergleich der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der in Tabelle 3-1 aufgeführten Simulationsläufe ausgewertet und mit den entsprechenden Ergebnissen aus dem Hydro_AS-2D-Modell verglichen. Zur Analyse und Visualisierung wurde das QGIS-Plugin Crayfish verwendet. In Tabelle 3-2 sind die berechneten Wasserspiegelauslenkungen am Pegel Stah für alle Simulationsläufe beider Modelle aufgeführt. In Diagramm 2 sind die Ergebnisse im Vergleich zur bereitgestellten Abflusskurve dargestellt. Dabei handelt es sich um die von der Bezirksregierung Köln zur Verfügung gestellte Abflusskurve 120, welche für Abflüsse größer 68 m³/s extrapolierte Werte enthält. Es kann also nicht sicher gesagt werden, dass die Werte für diese Abflüsse mit der Realität übereinstimmen. Die Vermutung liegt nahe, dass sie zu hoch angesetzt sind. Die Rauheitsbeiwerte wurden aus dem kalibrierten Hydro_AS-2D-Modell übernommen. Eine Auflistung der verwendeten Rauheitsbeiwerte ist Anhang A.2 zu entnehmen. Das Hydro_AS-2D-Modell wurde anhand von Pegeldaten kalibriert. Zusätzlich wurde eine Plausibilitätsprüfung anhand von Fotos und durch ortskundiges Personal vorgenommen.

Im gesamten Abschnitt werden Differenzen (bspw. Wasserspiegeldifferenzen, Geländehöhendifferenzen etc.) wie folgt gebildet:

$$\text{Differenz} = \text{Parameter}_{\text{Basement}} - \text{Parameter}_{\text{Hydro_AS-2D}} \quad (26)$$

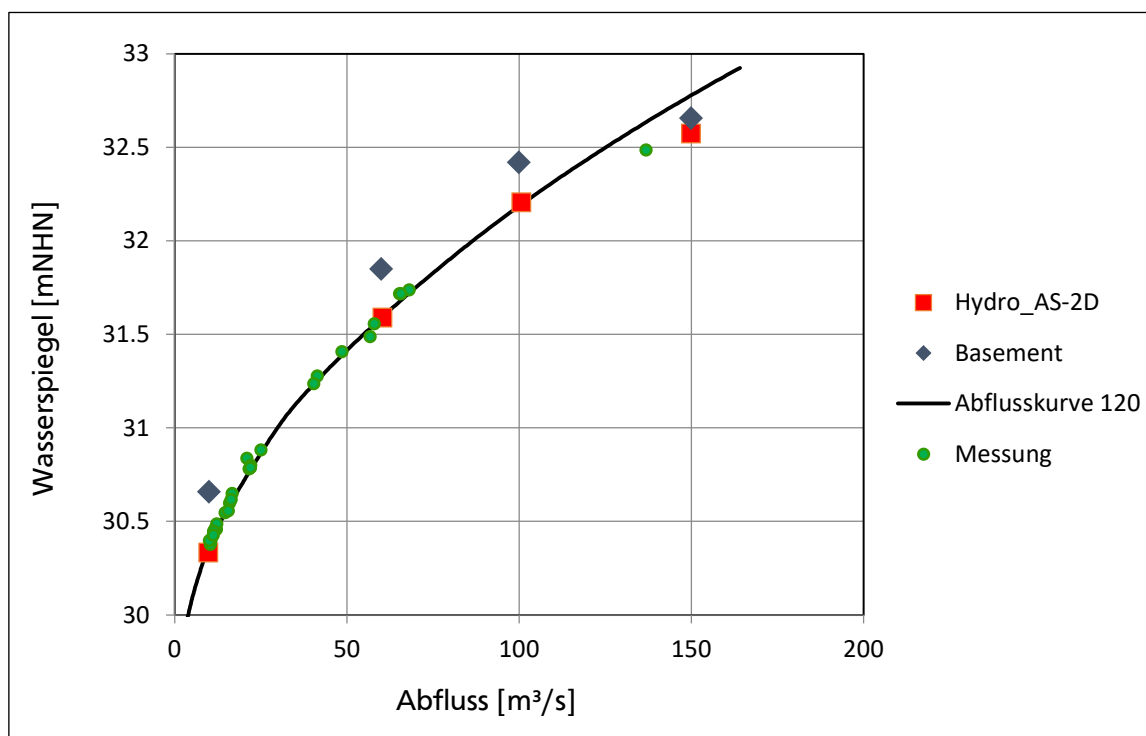


Diagramm 2: Wasserspiegel am Pegel Stah

Tabelle 3-2: Wasserspiegel am Pegel Stah in mNHN

Simulationslauf	S1	S2	S3	S4
Abfluss [m^3/s]	10	60	100	150
WSP BASEMENT [mNHN]	30,66	31,85	32,42	32,65
WSP Hydro_AS-2D [mNHN]	30,33	31,59	32,20	32,57
Wasserspiegeldifferenz [cm]	33	26	22	8

Simulationslauf S1 ($Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$)

In diesem Simulationslauf wurde geprüft wie in beiden Modellen Niedrigwasserverhältnisse abgebildet werden. Beim Vergleich der Pegelwasserstände fällt auf, dass hier die größten Abweichungen zwischen beiden Modellen auftreten. So beträgt die Differenz am Pegel Stah 33 cm. Der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell ist somit deutlich höher als im Hydro_AS-2D-Modell und liegt deutlich über der Abflusskurve. Beim Vergleich der Überschwemmungsflächen wird dagegen ersichtlich, dass es im BASEMENT-Modell im Gegensatz zum Hydro_AS-2D-Modell zu keinen Ausuferungen kommt.

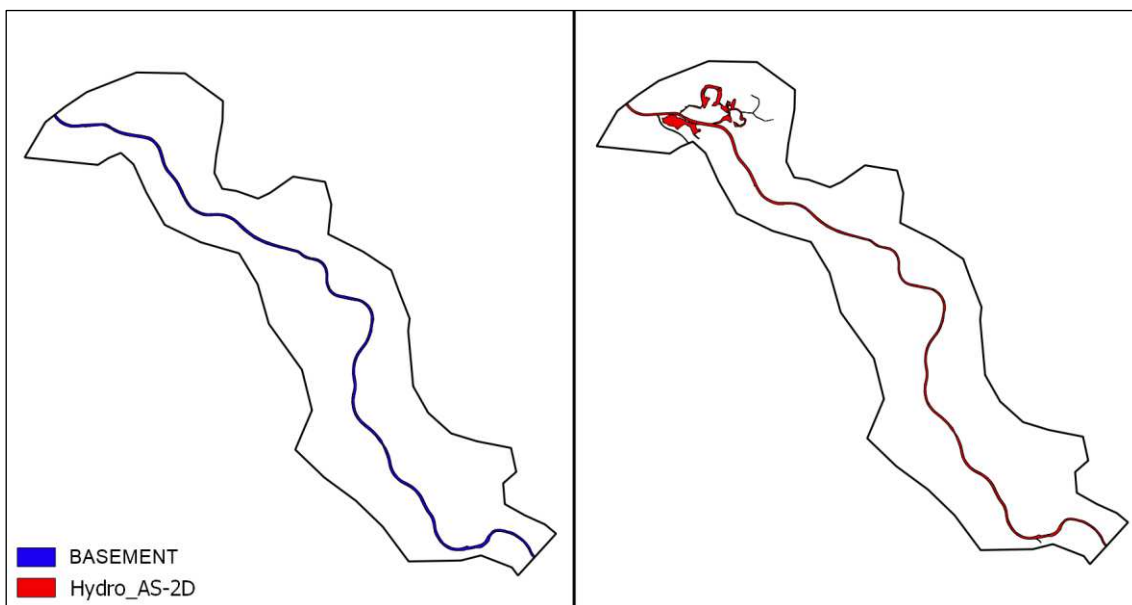


Abbildung 3-15: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S1

Um die Ursache hierfür zu identifizieren, wurden die Wasserspiegel beider Modelle entlang des Flussschlauchs analysiert. In Abbildung 3-16 ist die Differenz beider Wasserspiegel visualisiert. In den meisten Bereichen ist der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell 10 cm bis 30 cm höher. Hinter einem Absturz fällt der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell jedoch deutlich ab und ist ab dieser Stelle mehr als 50 cm geringer als im Hydro_AS-2D-Modell. Dies stellt genau den Abschnitt dar, in dem es im Hydro_AS-2D-Modell zu den Ausuferungen kommt. Durch den geringeren Wasserspiegel sind diese Ausuferungen im BASEMENT-Modell nicht vorhanden. Nach einer Sohlstufe steigt der

Wasserspiegel im BASEMENT-Modell dann wieder stark an, sodass der Wasserspiegel am Pegel Stah letztendlich über 30 cm höher ist als im Hydro_AS-2D-Modell. Im Bereich von sprunghaften Änderungen der Geländehöhe kommt es also zu besonders starken Abweichungen zwischen beiden Modellen.

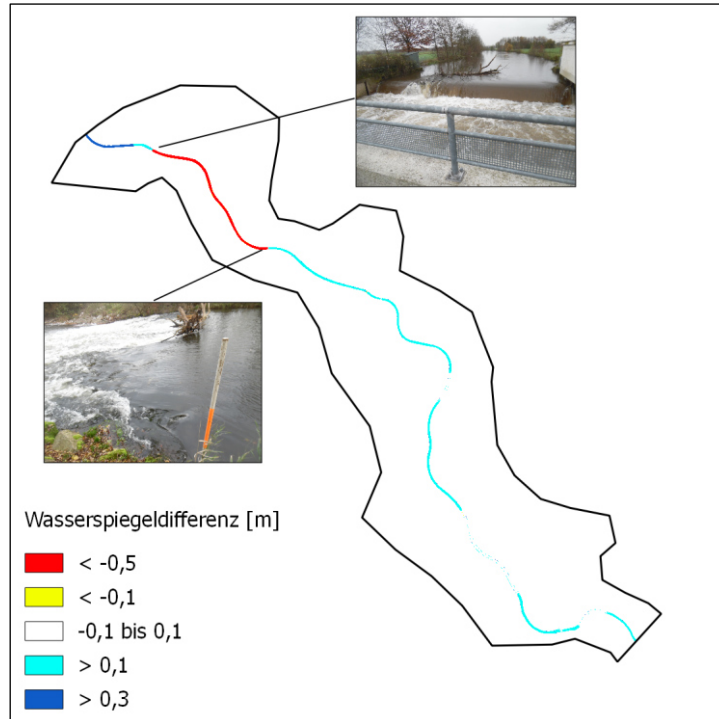


Abbildung 3-16: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D für S1

Simulationslauf S2 ($Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$)

In diesem Simulationslauf wurde ein stationärer Abfluss von $60 \text{ m}^3/\text{s}$ simuliert. Wie Tabelle 3-2 zu entnehmen ist, liegt die Wasserspiegeldifferenz am Pegel Stah für diesen Simulationslauf bei 26 cm. Abgesehen von einigen Überschwemmungsflächen am nördlichen Rand ist der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell stets höher (siehe Abbildung 3-21). Auch bei Betrachtung der Überschwemmungsflächen beider Modelle lassen sich einige Unterschiede identifizieren. Im nördlichen Bereich des Modellgebiets kommt es in beiden Modellen zu Ausuferungen. Diese unterscheiden sich jedoch in ihrer Ausprägung. Wie in Abbildung 3-18 zu sehen ist, lassen sich einige dieser Unterschiede auf die Auflösung des Netzes zurückführen. So sind im BASEMENT-Modell einige Strukturen deutlich gröber aufgelöst als im Hydro_AS-2D-Modell, wodurch zwangsläufig auch die Ausdehnung der Überschwemmungsflächen etwas gröber abgebildet wird. Im Hydro_AS-2D-Modell breitet sich das Wasser in diesem Bereich zudem etwas weiter nach Westen aus (rechts in Abbildung 3-18).

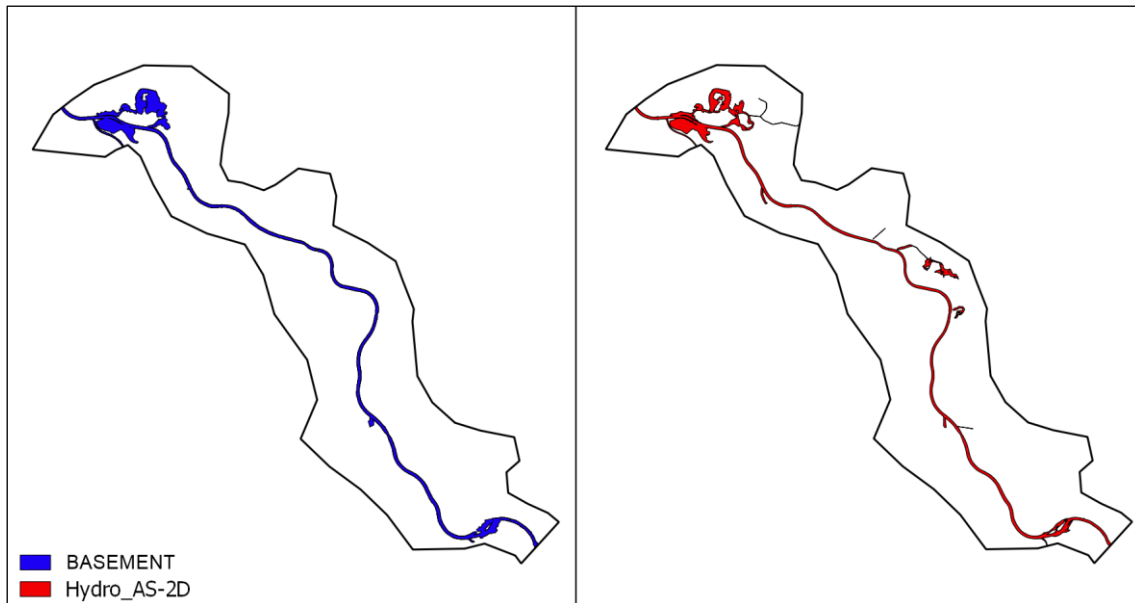


Abbildung 3-17: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S2

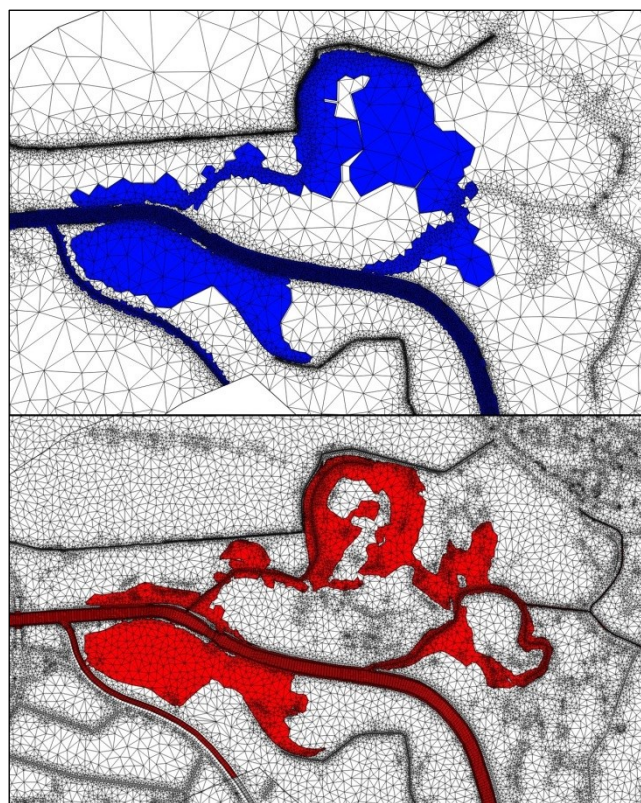


Abbildung 3-18: Überschwemmungsflächen im Norden des Modellgebiets

Bei genauer Betrachtung der Wassertiefe im Flussschlauch fällt zudem auf, dass die Abgrenzung zwischen trockenen und nassen Elementen in Hydro_AS-2D wesentlich gleichförmiger ist als in BASEMENT (siehe Abbildung 3-19). Auch hierfür kann die Ursache in der Struktur des Netzes liegen. In Hydro_AS-2D liegt im Flussschlauch ein strukturiertes Netz aus Dreiecks- und Viereckselementen vor. Durch die parallele Ausrichtung der

Viereckselemente im Flussschlauch ist eine deutlich gleichförmigere Abgrenzung gegeben. In BASEMENT wird ausschließlich ein unstrukturiertes Dreiecksnetz verwendet. Eine weitere Ursache liegt in der Berechnung der Wassertiefe. In beiden Modellen wird die Wassertiefe durch die Differenz von Wasserspiegel und Geländehöhe berechnet. In BASEMENT wird jedem Knoten, der nicht mehr unter Wasser steht, als Wasserspiegel die Geländehöhe zugewiesen. In Hydro_AS-2D wird jeweils dem ersten Nachbarknoten, der nicht mehr unter Wasser steht, ein extrapolierte Wasserspiegel zugewiesen. Der übernächste Knoten erhält dagegen den Wert 0. Bildet man nun in beiden Modellen die Differenz aus Wasserspiegel und Geländehöhe, erhält man unterschiedliche Verläufe. In BASEMENT reicht die Wassertiefe somit bis kurz vor den ersten trockenen Knoten. In Hydro_AS-2D liegt sie dagegen weiter in der Mitte, da dem Nachbarknoten ein extrapolierte Wasserspiegel und damit eine negative Wassertiefe zugewiesen wird. Der übernächste Knoten entspricht dann der negativen Geländehöhe. Dies ist in Diagramm 3 und Diagramm 4 für eine minimale Wassertiefe von 1 cm veranschaulicht.

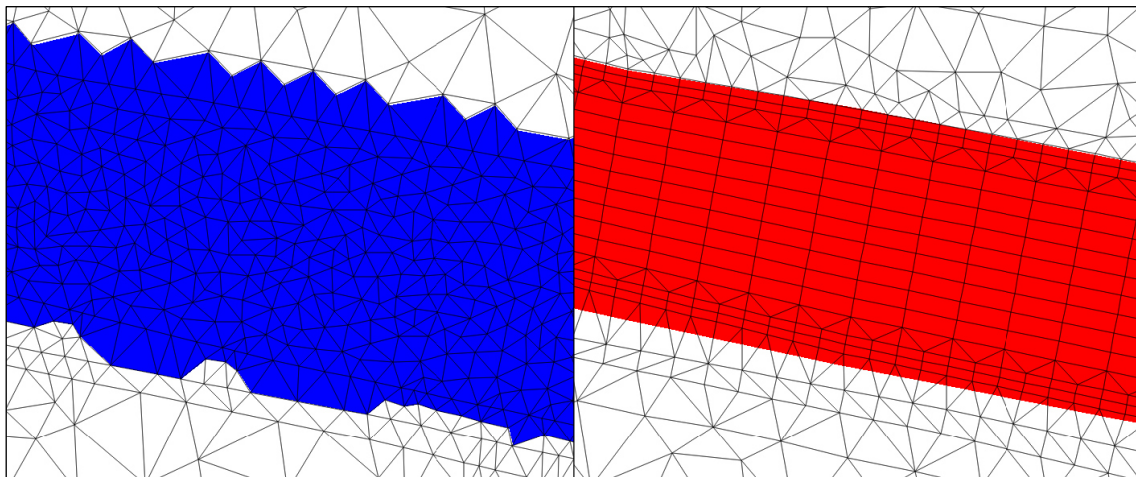


Abbildung 3-19: Abgrenzung der Wassertiefe im Flussschlauch (links BASEMENT, rechts Hydro_AS-2D)

In der Mitte des Modellgebiets kommt es zu weiteren kleineren Ausuferungen im Hydro_AS-2D-Modell, die im BASEMENT-Modell nicht abgebildet werden (siehe Abbildung 3-20). Grund hierfür sind die im Hydro_AS-2D-Modell integrierten Durchlässe. Da in BASEMENT Durchlässe nur über eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung abgebildet werden können, diese jedoch für die entsprechenden Stellen nicht bekannt waren, konnten die Durchlässe nicht aus dem bestehenden Modell übernommen werden. Infolgedessen stellt sich im BASEMENT-Modell in diesem Bereich ein höherer Wasserspiegel im Flussschlauch ein, es kommt jedoch zu keiner Entlastung über die Durchlässe wie im Hydro_AS-2D-Modell. Des Weiteren kommt es erneut an sprunghaften Änderungen der Geländehöhe wie bspw. an Sohlstufen zu den größten Wasserspiegeldifferenzen (siehe Abbildung 3-21).

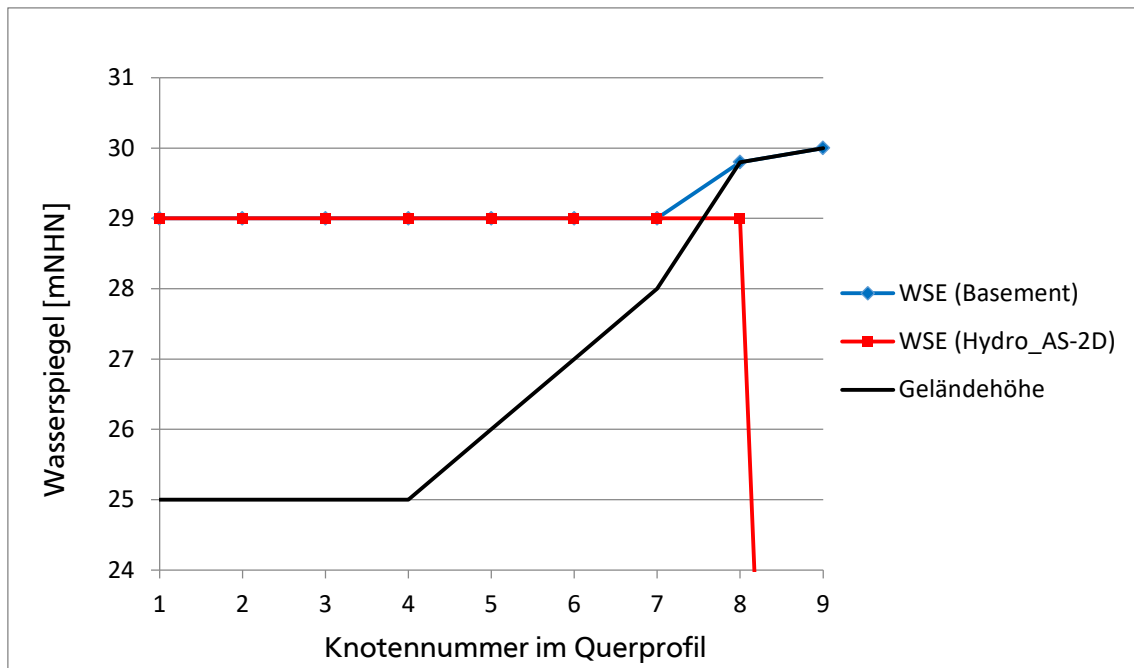


Diagramm 3: Zuweisung eines Wasserspiegels am Übergang von nassen zu trockenen Elementen (exemplarisch)

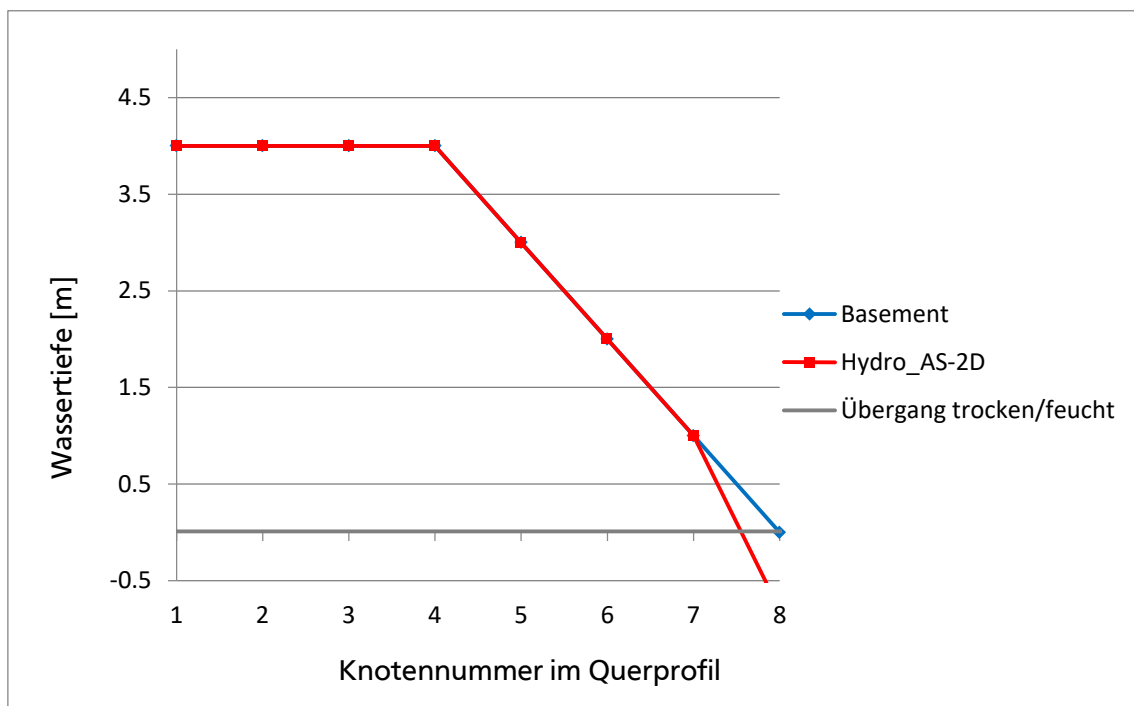


Diagramm 4: Zuweisung einer Wassertiefe am Übergang von nassen zu trockenen Elementen (exemplarisch)

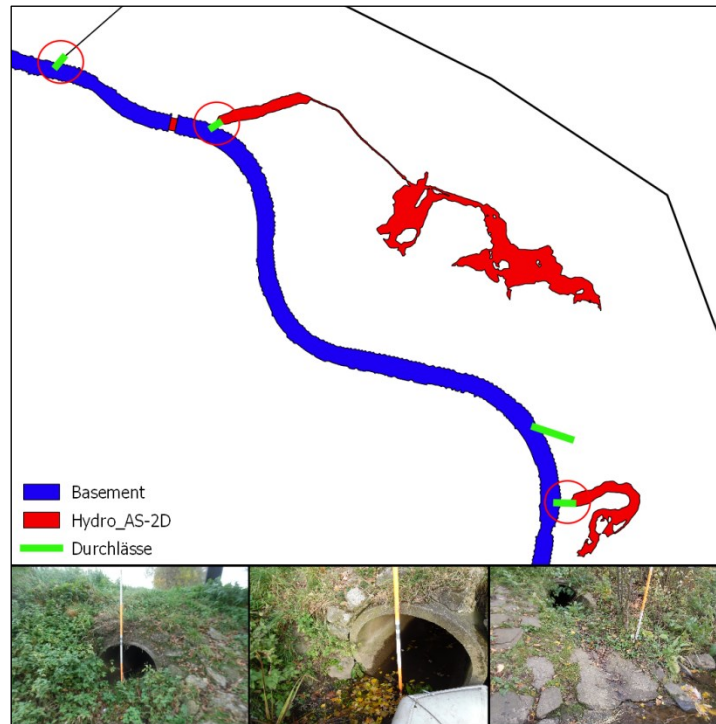


Abbildung 3-20: Unterschiedliche Ausdehnung der Überschwemmungsflächen im Bereich von Durchlässen

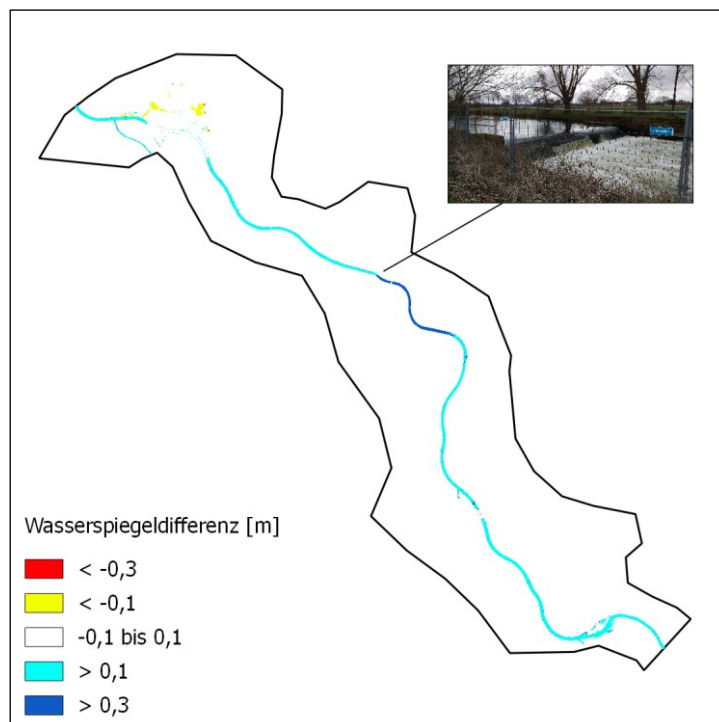


Abbildung 3-21: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und HYDRO_AS-2D für S2

Simulationslauf S3 ($Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$)

Für einen stationären Abfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt die Wasserspiegeldifferenz am Pegel Stah bei 22 cm. Auch bei der Ausdehnung der Überschwemmungsflächen kommt es zum Teil zu starken Abweichungen (siehe Abbildung 3-22). So fällt diese im BASEMENT-Modell in manchen Bereichen wesentlich größer aus. Am deutlichsten wird dies in der südlichen Hälfte des Modellgebiets östlich des Flusslaufs (rot markiert in Abbildung 3-22). Bei Betrachtung der Entwicklung der Überschwemmungsflächen über die Zeit kann die Stelle ermittelt werden, an der das Wasser zuerst über die Ufer tritt (siehe Abbildung 3-23).

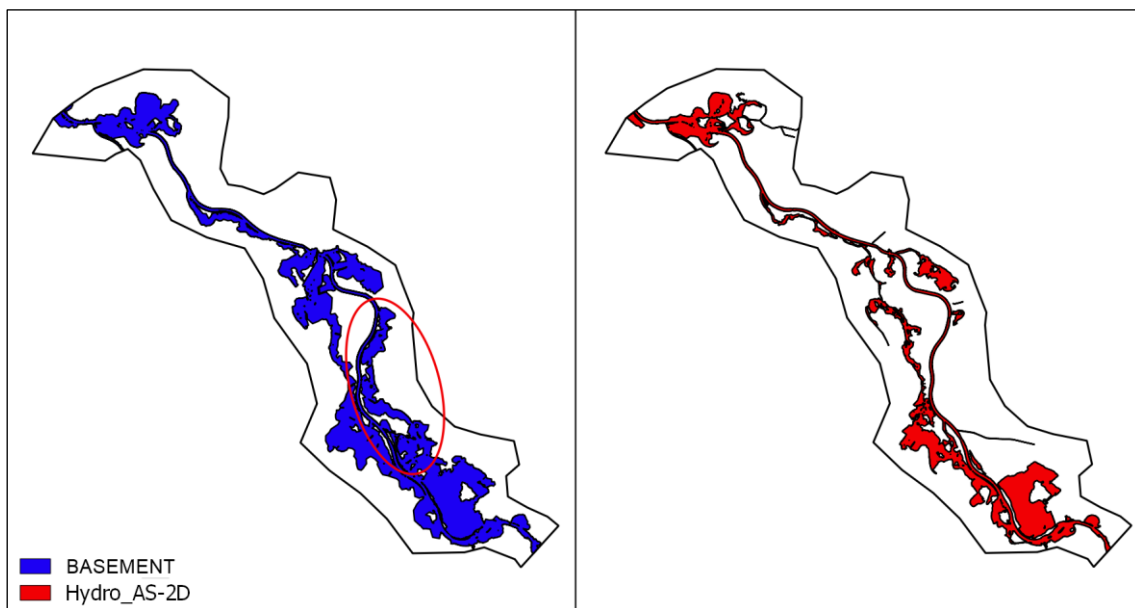


Abbildung 3-22: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S3

Um die Ursache hierfür zu identifizieren, wurden die Wasserspiegel und Geländehöhen beider Modelle in diesem Bereich näher analysiert und miteinander verglichen. Es fällt auf, dass der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell in diesem Bereich ca. 10 cm höher ist als im Hydro_AS-2D-Modell. Wie aus Abbildung 3-24 hervorgeht, gibt es zudem Abweichungen in den Geländemodellen. Im BASEMENT-Modell existieren einige Scharten in der Dammstruktur, an denen die Geländehöhe geringer ist als der lokale Wasserspiegel (blau gefärbt in Abbildung 3-24). Im Hydro_AS-2D-Modell gibt es keine solchen Scharten. Es liegt hier eine schärfere Abgrenzung vor. Durch die Kombination dieser beiden Faktoren kommt es im BASEMENT-Modell somit zu einem Durchfluss an diesen Stellen und zu einer Überflutung der tiefer gelegenen Flächen.

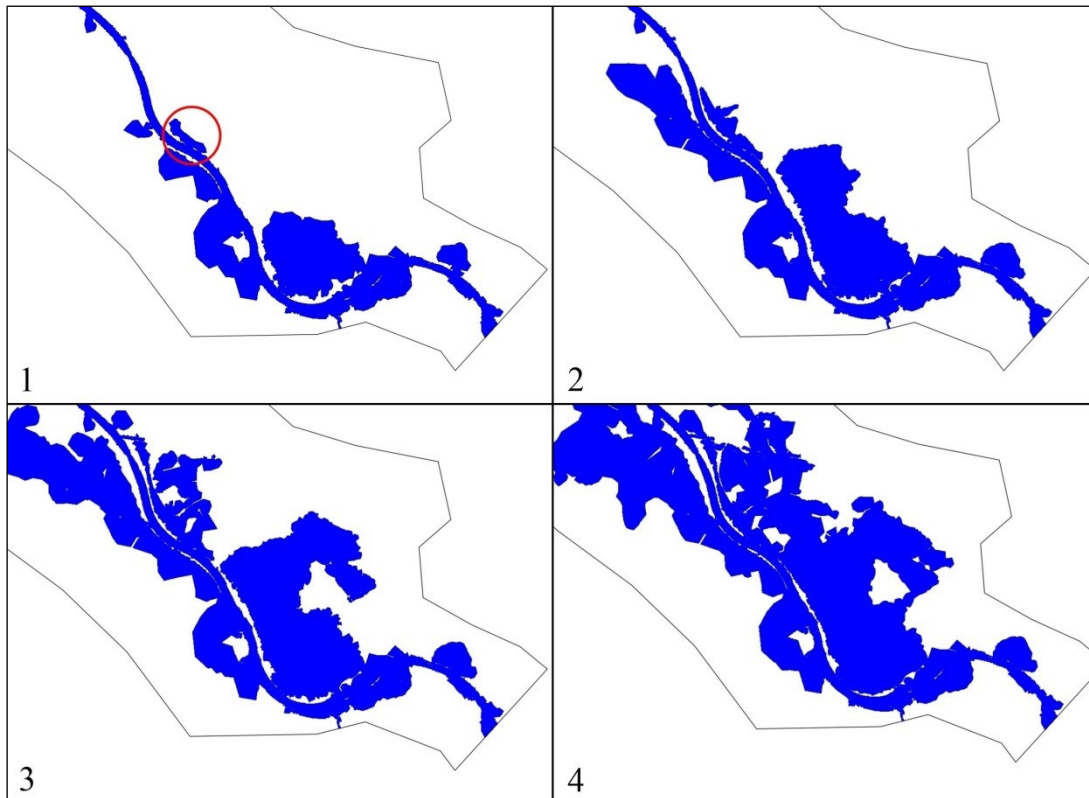


Abbildung 3-23: Entwicklung der Überschwemmungsflächen über die Zeit

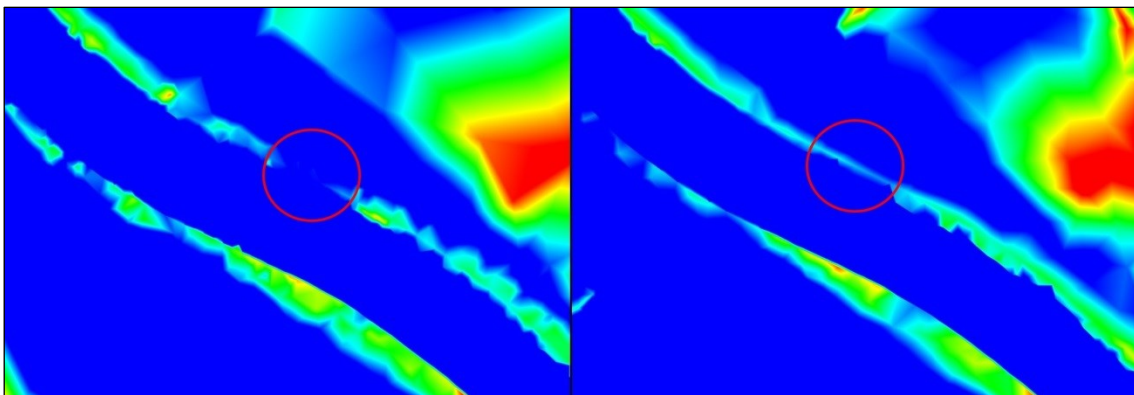


Abbildung 3-24: Vergleich der Geländemodelle an der kritischen Stelle; in blau gefärbten Bereichen liegt die Geländehöhe unterhalb des lokalen Wasserspiegels (links BASEMENT, rechts Hydro_AS-2D)

Ein ähnlicher Effekt tritt an einem stehenden Gewässer (Adolfosee) etwas weiter südlich im Modellgebiet auf. Auch hier liegen einige Scharten in der Dammstruktur vor. Infolgedessen liegt der Wasserspiegel des Adolfosees im BASEMENT-Modell mehr als 1 m höher (siehe Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26). Eine gröbere Netzauflösung im BASEMENT-Modell führt an solchen Stellen somit zu bedeutenden Unterschieden in den Berechnungsergebnissen.

Des Weiteren liegt erneut fast im gesamten Gebiet im BASEMENT-Modell ein höherer Wasserspiegel vor. Wieder kommt es im Bereich von Sohlstufen zu größeren Differen-

zen. In Abbildung 3-25 sind die Wasserspiegeldifferenzen visualisiert. Die größte Differenz ist, wie bereits erwähnt, im Bereich des Adolfooses zu sehen.

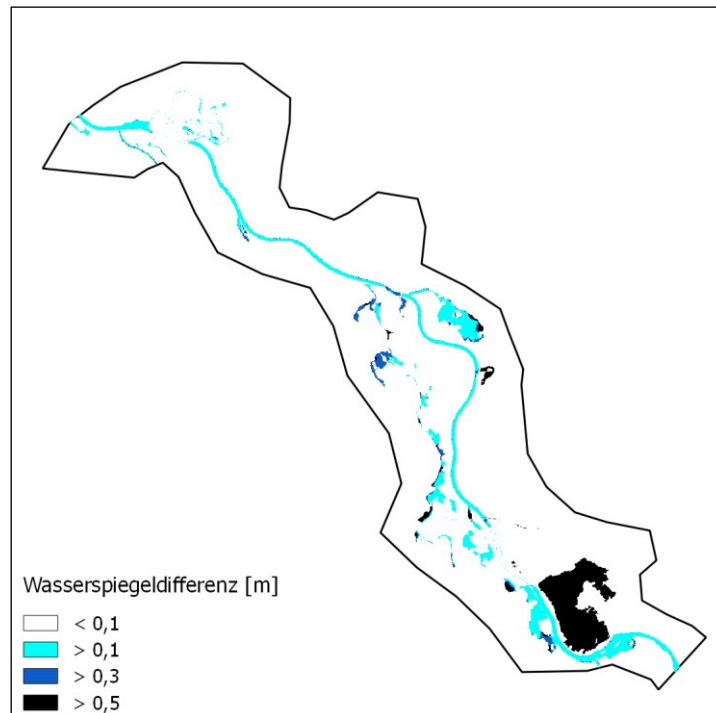


Abbildung 3-25: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D für S3

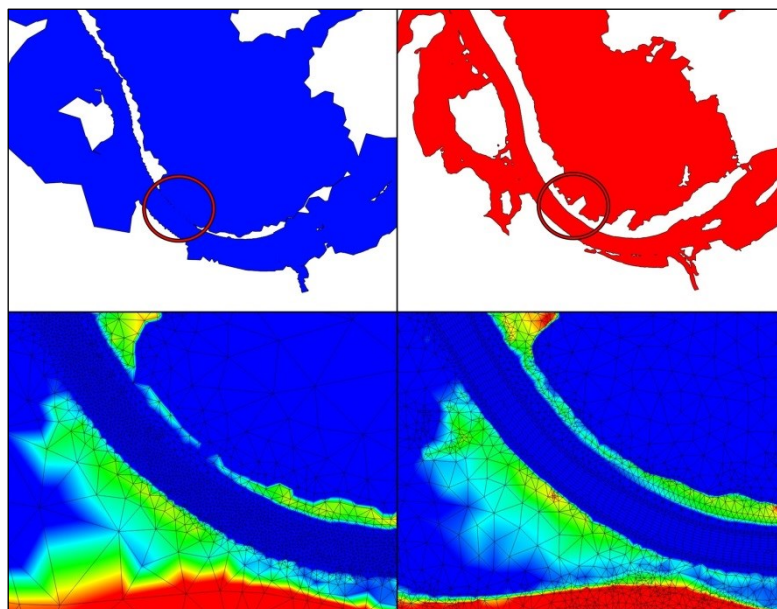


Abbildung 3-26: Oben: Überschwemmungsflächen am Adolfoosee, unten: Vergleich der Geländemodelle (links BASEMENT, rechts Hydro_AS-2D)

Für diesen Simulationslauf wurden außerdem Fließgeschwindigkeiten verglichen. Erwartungsgemäß (aufgrund des höheren Wasserspiegels) fallen diese im BASEMENT-Modell etwas geringer aus. Die Differenz liegt in den meisten Bereichen zwischen 0,1

m/s und 0,5 m/s. Nur an Wehren und Sohlstufen kommt es zu größeren Abweichungen. Es stellt sich in solchen Bereichen ein anderes Strömungsbild ein (siehe Abbildung 3-28).

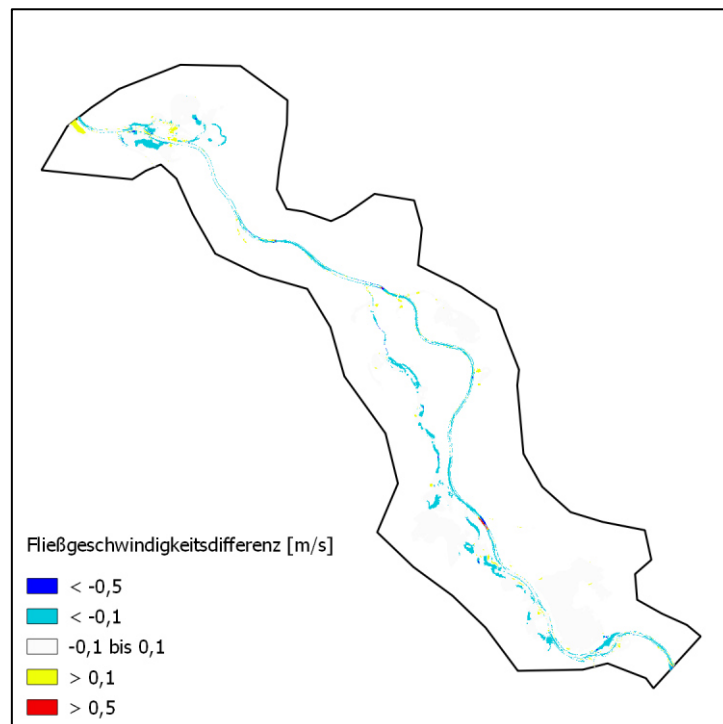


Abbildung 3-27: Fließgeschwindigkeitsdifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2d

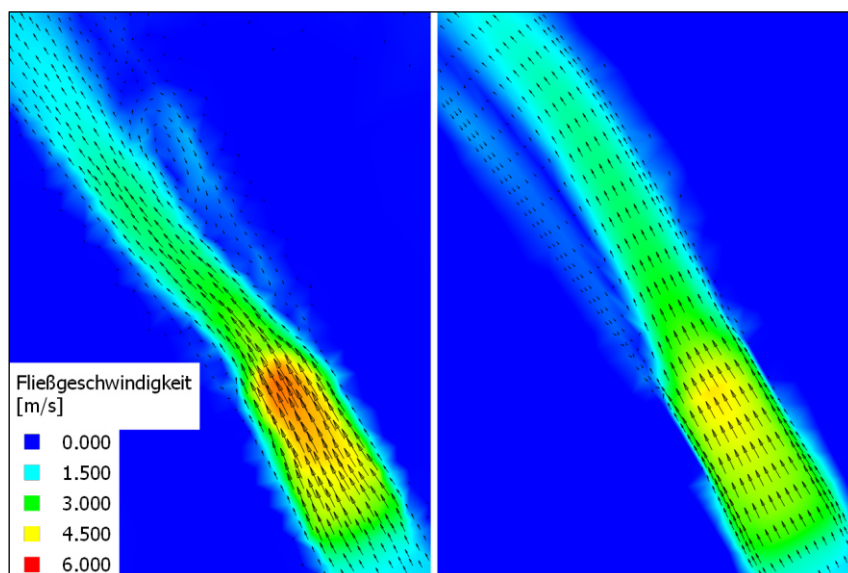


Abbildung 3-28: Unterschiedliches Strömungsbild an einer Sohlstufe (links BASEMENT, rechts Hydro_AS-2D)

Simulationslauf S4 ($Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$)

Dies stellt den Simulationslauf mit dem größten simulierten Abfluss dar. Die Wasserspiegeldifferenz am Pegel beträgt 8 cm. Beim größten Abfluss tritt somit die geringste Abweichung auf. Wie aus Abbildung 3-29 hervorgeht, liegt der Wasserspiegel im BASEMENT-Modell in großen Teilen des Modellgebiets jedoch noch immer 10 cm bis 30 cm höher als im Hydro_AS-2D-Modell.

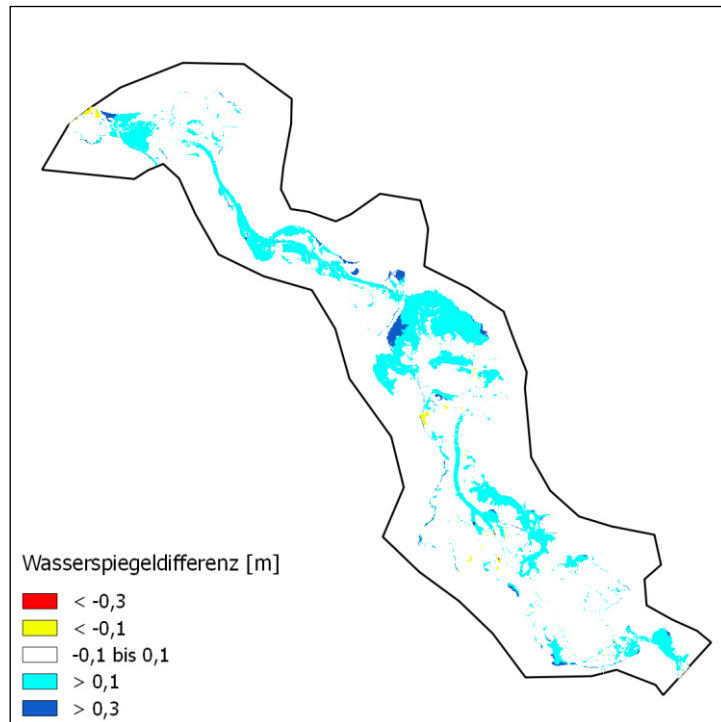


Abbildung 3-29: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2d für S4

Erneut liegt im BASEMENT-Modell in vielen Bereichen eine größere Ausdehnung der Überschwemmungsflächen vor. An einigen Stellen, insbesondere entlang von Grabenstrukturen, kommt es hingegen zu einer breiteren Ausdehnung im Hydro_AS-2D-Modell. Wie in Abbildung 3-31 zu sehen ist, breitet sich das Wasser in Hydro_AS-2D entlang von Grabenstrukturen aus, während dies in BASEMENT nicht der Fall ist. Die Ursache hierfür liegt in der ungenaueren Auflösung der Gräben an einigen Stellen, wie aus den unteren Abbildungen hervorgeht.

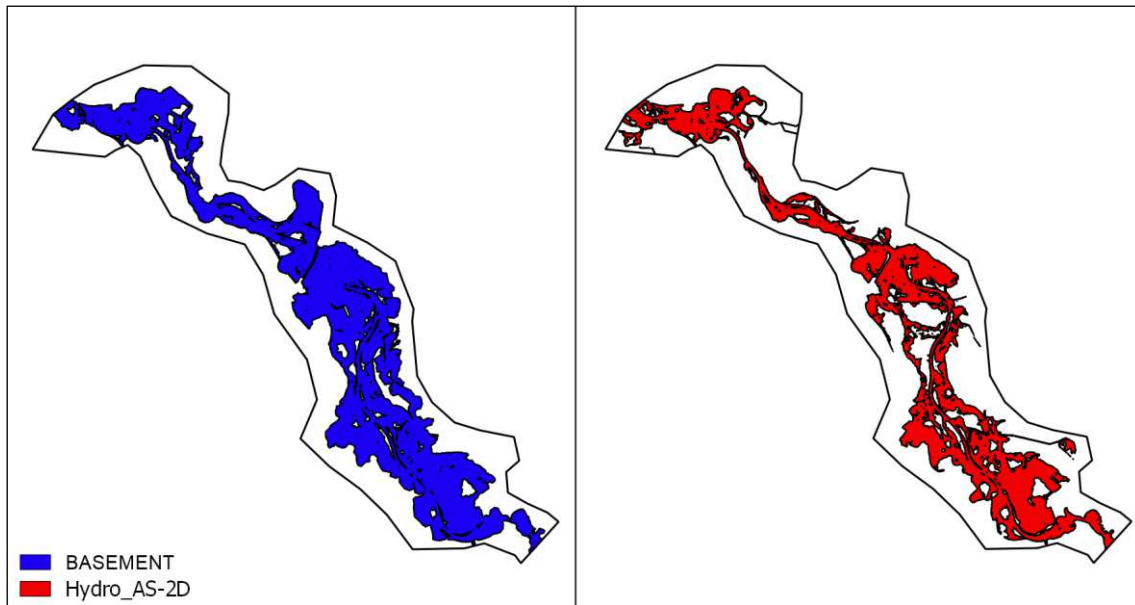


Abbildung 3-30: Vergleich der Überschwemmungsflächen für S4

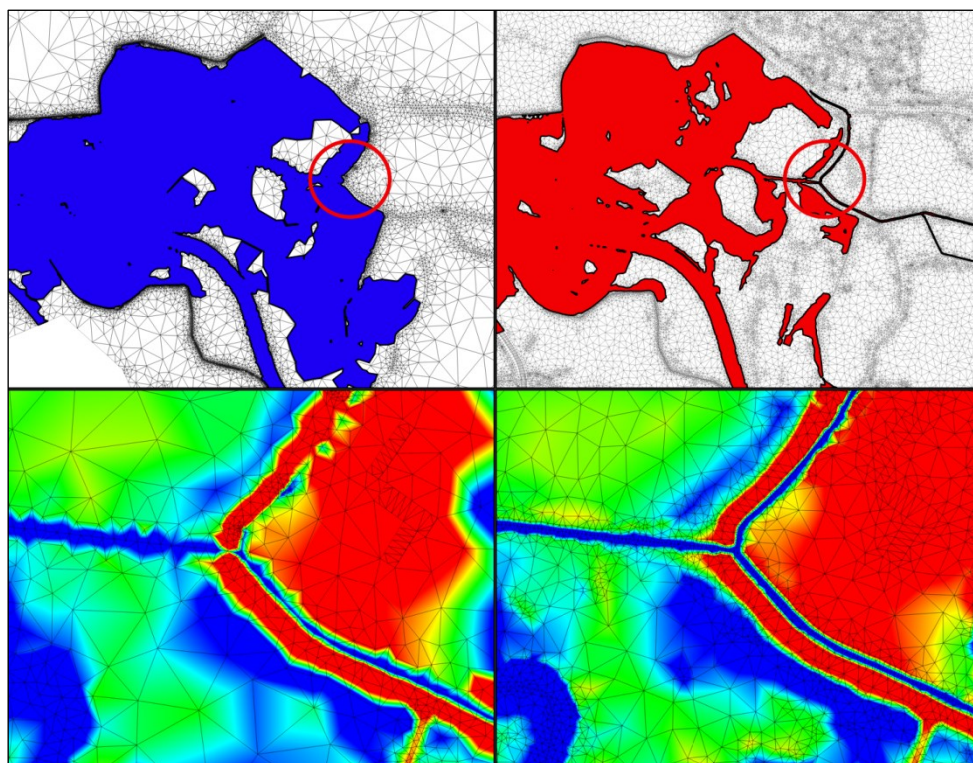


Abbildung 3-31: Unterschiedliche Ausbreitung der Überschwemmungsflächen entlang von Grabenstrukturen (oben) aufgrund unterschiedlicher Netzauflösung (unten); links BASEMENT, rechts Hydro_AS-2D

Fazit

In allen vier Simulationsläufen liegt der Wasserspiegel am Pegel Stah im BASEMENT-Modell deutlich über der Abflusskurve. Im gesamten Gebiet kommt es zum Teil zu deutlichen Abweichungen hinsichtlich Wasserspiegelauslenkung und Ausdehnung der Über-

schwemmungsflächen zwischen beiden Modellen. Auffällig ist der fast konstant höhere Wasserspiegel im BASEMENT-Modell. Als Folge davon kommt es zu einer größeren Ausdehnung der Überschwemmungsflächen. Unterschiede in der Geländeauflösung verstärken diese Effekte zum Teil. Im Bereich von sprunghaften Änderungen der Geländehöhe kommt es zu besonders starken Abweichungen. Des Weiteren fällt auf, dass die Abweichungen mit steigendem Abfluss geringer werden.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass hinsichtlich der Überschwemmungsflächen keine Aussage darüber getroffen werden kann, welches Modell die Realität besser abbildet. Es können lediglich Unterschiede und mögliche Ursachen beschrieben werden. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass - aufgrund der zu hohen Wasserspiegel am Pegel - der Wasserspiegel im gesamten BASEMENT-Modell zu hoch ausfällt. Durch eine Variation der Rauheit kann dies beeinflusst werden. Die Rauheitsbeiwerte wurden aus dem kalibrierten Hydro_AS-2D-Modell übernommen.

3.4 Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung

Nachdem das BASEMENT-Modell anhand der vier verschiedenen stationären Abflüsse getestet wurde und die zugehörigen Berechnungsergebnisse im vorherigen Abschnitt ausgewertet wurden, soll in diesem Abschnitt auf den Kalibrierungsprozess und die Sensitivität der einzelnen Parameter eingegangen werden. Dazu wurde der Simulationslauf S3 ($Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$) mit verschiedenen Parameterkonfigurationen wiederholt. Den maßgeblichen Kalibrierungsparameter stellt der Rauheitsbeiwert (in diesem Fall nach Strickler) dar. Zusätzlich wurden jedoch noch weitere Parameter analysiert. Insgesamt wurden folgende Parameter betrachtet:

- Rauheitsbeiwerte
- Sohlgefälle der Auslaufrandbedingung
- Lösungsalgorithmus
- Turbulenzmodell

In den vorherigen Simulationsläufen wurden die Rauheitsbeiwerte des kalibrierten Hydro_AS-2D-Modells übernommen. Um den Einfluss der Rauheitsbeiwerte zu ermitteln, wurden zwei zusätzliche Simulationsläufe durchgeführt. Dabei wurden die k_{st} -Werte aller Landnutzungsflächen gemeinsam variiert. Auf die Variation einzelner k_{st} -Werte (bpsw. nur der Gewässersohle) wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Bei einem Simulationslauf wurden alle k_{st} -Werte um 10 % erhöht, in einem anderen Simulationslauf wurden alle k_{st} -Werte um 10 % verringert. Die Neigung der Auslaufbedingung wurde um 2 ‰ variiert. In den vorherigen Simulationsläufen wurde der approximative HLLC-Riemann-Löser verwendet. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde ein zusätzlicher Simulationslauf unter Verwendung des exakten Riemann-Lösers durchgeführt. Zur Berücksichtigung der Turbulenz kann in BASEMENT ein algebraisches Turbulenzmodell hinzugeschaltet werden, welches die Wirbelviskosität dynamisch berechnet (siehe Abschnitt 2.1.1). Alternativ kann auch eine konstante Wirbelviskosität definiert werden. In einem zusätzlichen Simulationslauf wurde das algebraische Turbulenzmodell hinzugeschaltet.

Im Anschluss an die Sensitivitätsanalyse wurde mithilfe der daraus gewonnenen Erkenntnisse versucht, in einem weiteren Simulationslauf mit kalibrierten Parametern, den gemessenen Wasserspiegel am Pegel möglichst genau zu treffen. Ein exakt kalibriertes Modell aufzusetzen, war jedoch kein vorrangiges Ziel dieser Arbeit.

In Tabelle 3-3 sind noch einmal alle Simulationsläufe des Kalibrierungsprozesses zusammengefasst. Tabelle 3-4 enthält die entsprechenden Berechnungsergebnisse für den Wasserspiegel am Pegel Stah.

Tabelle 3-3: Simulationsläufe der Sensitivitätsanalyse (variierte Parameter sind grün hinterlegt)

Simulations- lauf	k_{st} -Werte	Sohlgefälle am Auslauf	Lösungs- verfahren	Turbulenzmo- dell
K1	+ 10 %	3 ‰	HLLC	-
K2	- 10 %	3 ‰	HLLC	-
K3	gem. S3	+2 ‰	HLLC	-
K4	gem. S3	-2 ‰	HLLC	-
K5	gem. S3	3 ‰	Exakt	-
K6	gem. S3	3 ‰	HLLC	Algebraisch
K7	+ 20 %	3 ‰	HLLC	-

Tabelle 3-4: Wasserspiegel am Pegel Stah für die verschiedenen Simulationsläufe ((H) steht für Hydro_AS_2D und (B) für BASEMENT)

Simulations- lauf	S3 (H)	S3 (B)	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Wasserspiegel [mNHN]	32,20	32,42	32,37	32,47	32,32	32,52	32,43	32,42	32,28

Neben dem Einfluss der Variation der einzelnen Parameter auf den Wasserspiegel am Pegel wurde auch der Einfluss auf die Überschwemmungsflächen betrachtet.

Simulationslauf K1

Bei diesem Simulationslauf wurden alle k_{st} -Werte um 10 % erhöht. Die Rauheit wurde somit verringert. Erwartungsgemäß führt dies zu einem geringeren Wasserspiegel am Pegel (siehe Tabelle 3-4). Die Differenz zum kalibrierten Hydro_AS-2D-Modell (bzw. den Messungen) beträgt ca. 17 cm und stellt somit eine leichte Annäherung im Vergleich zum Simulationslauf S3 dar. Im gesamten Modellgebiet ist der Wasserspiegel ca. 5 cm geringer als im vorherigen Simulationslauf (siehe Abbildung 3-32).

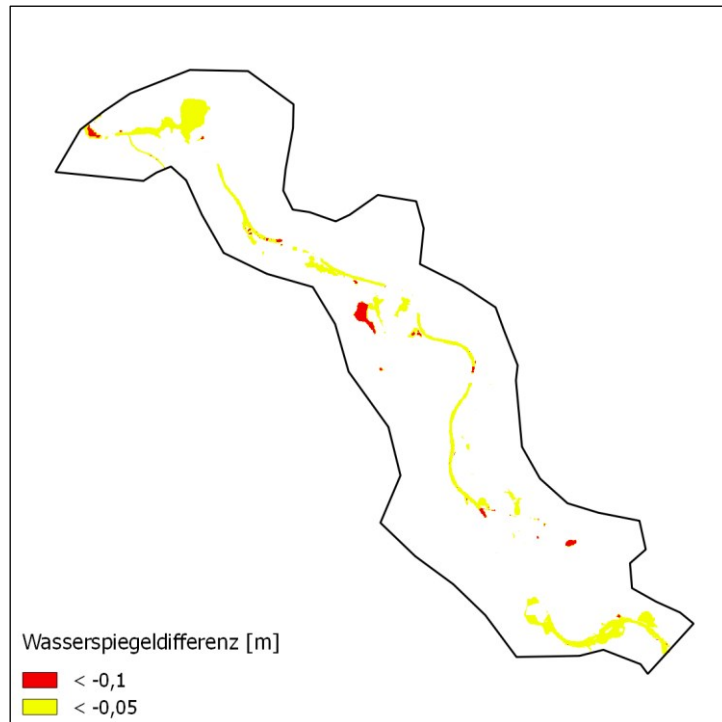


Abbildung 3-32: Wasserspiegeldifferenz zwischen K1 und S3

Auf die Ausdehnung der Überschwemmungsflächen hat dies jedoch kaum Auswirkungen (siehe Abbildung 3-33).

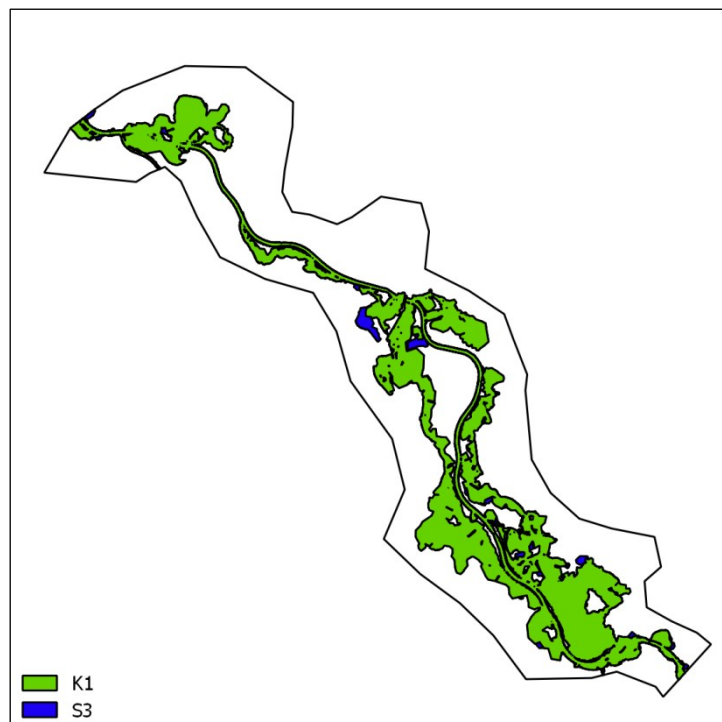


Abbildung 3-33: Vergleich der Überschwemmungsflächen von K1 und S3

Insgesamt führt die Erhöhung der k_{st} -Werte um 10 % somit zu einem geringeren Wasserspiegel in großen Teilen des Modellgebietes und damit auch am Pegel. Die Differenz liegt weitestgehend in einem Bereich zwischen 5 cm und 10 cm. Die Ausdehnung der Überschwemmungsflächen wird dadurch kaum beeinflusst und es bestehen weiterhin starke Abweichungen zum Hydro_AS-2D-Modell.

Simulationslauf K2

Im Gegensatz zu K1 wurden bei diesem Simulationslauf alle k_{st} -Werte um 10 % verringert. Infolge der größeren Rauheit im gesamten Modell, erhöht sich der Wasserspiegel am Pegel um 5 cm. Auch im restlichen Modellgebiet ist der Wasserspiegel gestiegen.

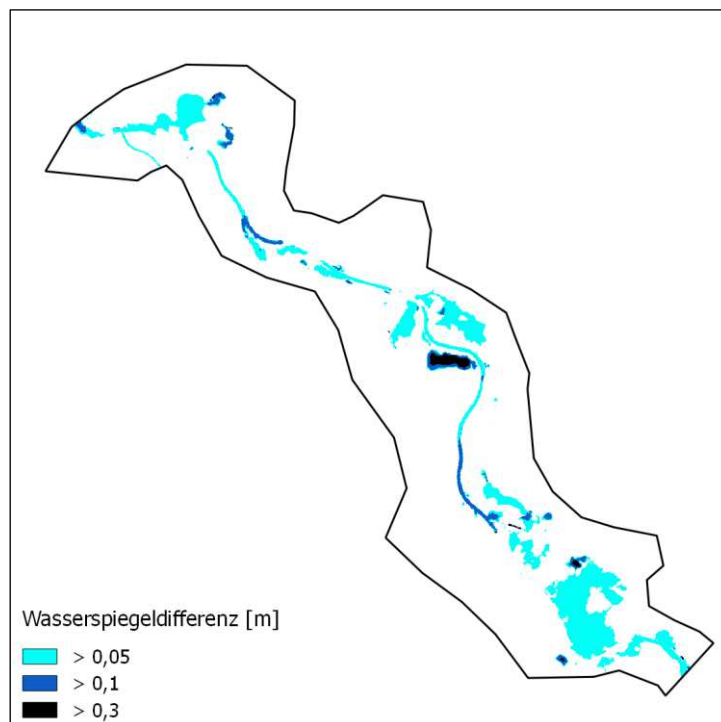


Abbildung 3-34: Wasserspiegeldifferenz zwischen K2 und S3

Demzufolge fallen auch die Überschwemmungsflächen geringfügig größer aus. Die Ergebnisse sind damit noch weiter vom Hydro_AS-2D-Modell entfernt.

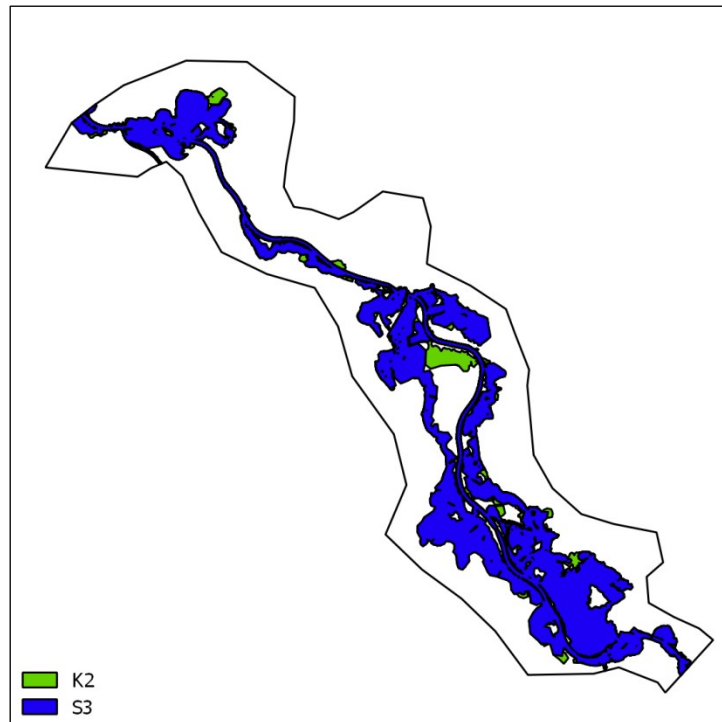


Abbildung 3-35: Vergleich der Überschwemmungsflächen zwischen K2 und S3

Für diesen Simulationslauf liegen zudem Vergleichswerte des Hydro_AS-2D-Modells vor. Auch in Hydro_AS-2D wurden für einen Simulationslauf alle k_{st} -Werte um 10 % verringert. Dies führte am Pegel zu einer Erhöhung des Wasserspiegels um 12 cm. Im direkten Vergleich reagiert das BASEMENT-Modell also weniger sensitiv auf eine Änderung der k_{st} -Werte.

Tabelle 3-5: Vergleich der Sensitivität hinsichtlich Variation der Rauheitsbeiwerte

	BASEMENT		Hydro_AS-2D	
Variation der k_{st} -Werte	-	-10 %	-	-10 %
Wasserspiegel [mNHN]	32,42	32,47	32,20	32,32
Wasserspiegeldifferenz [cm]	5		12	

Simulationslauf K3

Mit den Simulationsläufen K3 und K4 soll der Einfluss der Auslaufrandbedingung quantifiziert werden. Am Auslaufrand muss ein Sohlgefälle definiert werden, um die Wasserstands-Abfluss-Beziehung unter Normalabflussbedingungen berechnen zu können. Gemäß dem Benutzerhandbuch muss dieses Sohlgefälle nicht zwangsläufig dem tatsächlich in der Natur vorhandenen Gefälle entsprechen, sondern kann auch einen Kalibrierungsparameter darstellen (BASEMENT Reference Manual 2018). Im Ausgangsmodell wurde für das Sohlgefälle ein Wert von 3 ‰ festgelegt. In diesem Simulationslauf wurde das Gefälle auf einen Wert von 5 ‰ erhöht. In Abbildung 3-36 ist zu sehen, dass die

Erhöhung um 2 ‰ einen signifikanten Einfluss auf den Wasserspiegel am Pegel Stah hat. So ist der Wasserspiegel 10 cm geringer als im Ausgangsmodell. Der Einfluss reicht insgesamt ca. 750 m stromaufwärts bis zu einer Sohlstufe. Ohne diese sprunghafte Änderung der Geländehöhe würde der Einfluss vermutlich noch weiter reichen. Das Gefälle am Auslaufrand stellt somit in diesem einen durchaus sensitiven Kalibrierungsparameter dar.

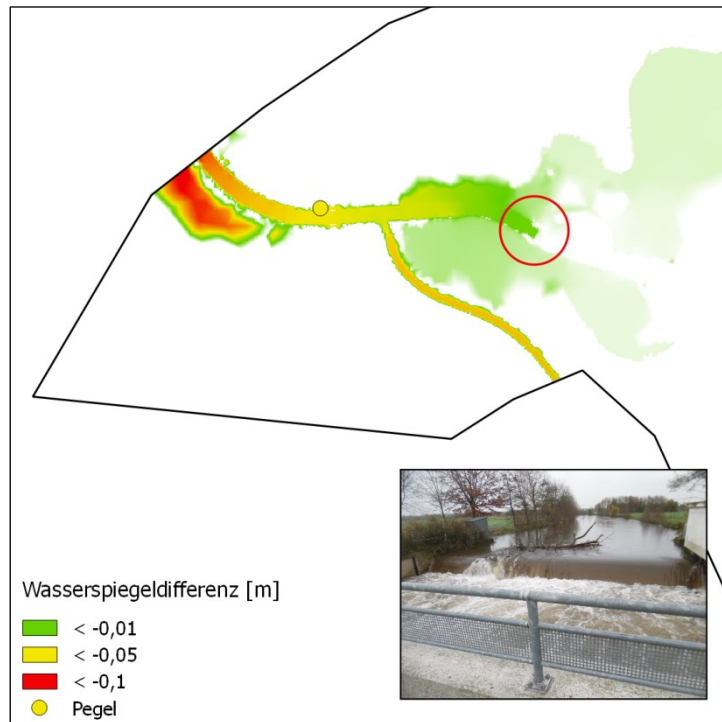


Abbildung 3-36: Wasserspiegeldifferenz infolge Variation des Gefälles am Modellrand

Simulationslauf K4

Im Gegensatz zum Simulationslauf K3 wurde das Gefälle am Auslaufrand um 2 ‰ reduziert. Erwartungsgemäß steigt der Wasserspiegel am Auslaufrand und im Bereich des Pegels an. Der Wasserspiegel am Pegel ist somit ca. 10 cm höher als im Ausgangsmodell. In diesem Fall geht der Einfluss sogar noch leicht über die Sohlschwelle hinaus.

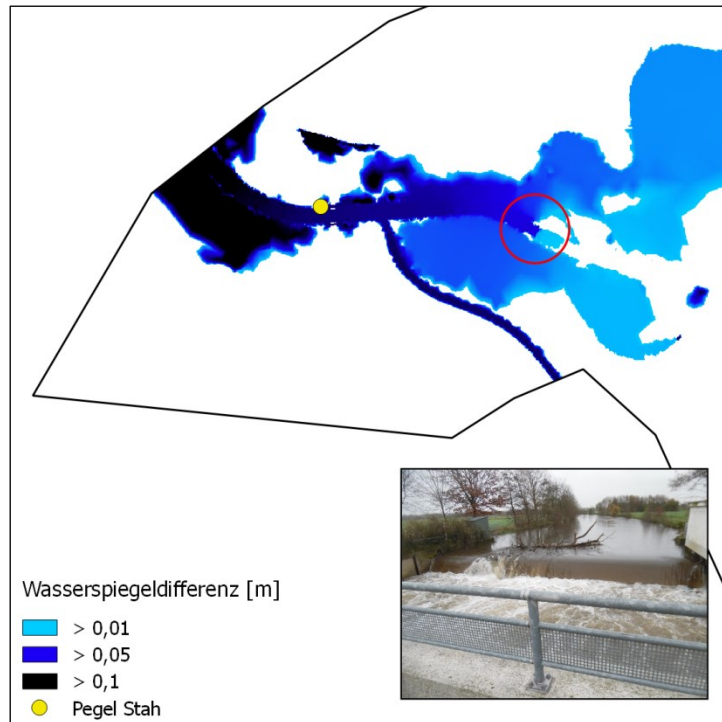


Abbildung 3-37: Wasserspiegeldifferenz infolge Variation des Gefälles am Modellrand

Simulationslauf K5

In BASEMENT stehen drei verschiedene Riemann-Löser zur Verfügung. In allen bisherigen Simulationsläufen wurde mit dem approximativen HLLC-Riemann-Löser gerechnet. Um den Einfluss des Lösungsalgorithmus auf die Ergebnisse zu überprüfen, wurde in diesem Simulationslauf mit dem exakten Riemann-Löser gerechnet. Hierbei kam es jedoch zu keinen signifikanten Unterschieden zum Vergleichssimulationslauf S3. Die Wasserspiegeldifferenz am Pegel Stah liegt bei 1 cm, was jedoch auch auf Abflussschwankungen zurückzuführen sein kann. Die Wahl des Riemann-Lösers stellt somit in diesem Fall keinen sensitiven Parameter dar.

Simulationslauf K6

In BASEMENT besteht die Möglichkeit, ein algebraisches Turbulenzmodell hinzuschalten. In allen bisher durchgeführten Simulationen war das Turbulenzmodell nicht aktiviert. Um dessen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse zu ermitteln, wurde es in diesem Simulationslauf hinzugeschaltet. Es konnte jedoch weder hinsichtlich der Wasserspiegelauslenkung noch hinsichtlich der Ausdehnung der Überschwemmungsflächen ein Unterschied festgestellt werden. Das Turbulenzmodell stellt somit keinen sensitiven Parameter für die Berechnungen dar.

Simulationslauf K7

Wie bereits erwähnt, war es kein vordergründiges Ziel dieser Arbeit, ein exakt kalibriertes Modell zu erstellen. Vielmehr ging es darum, einen Ergebnisvergleich bei gleichen Parametern zwischen BASEMENT und Hydro_AS-2D durchzuführen sowie Unterschiede

hinsichtlich der Kalibrierungsparameter herauszuarbeiten. Nichtsdestotrotz wurde in einem letzten Simulationslauf K7 versucht, auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse, den gemessenen Wasserspiegel möglichst genau zu treffen. Hierzu wurden alle k_{st} -Werte um 20 % erhöht. In Simulationslauf K1 wurden die k_{st} -Werte um 10 % erhöht. Der Wasserspiegel lag jedoch noch immer 16 cm über dem gemessenen.

Für K7 beträgt die Wasserspiegeldifferenz am Pegel Stah nur noch 8 cm. Der Wasserspiegel ist in BASEMENT somit noch immer zu hoch, obwohl die k_{st} -Werte um 20 % erhöht wurden. In einigen Bereichen beträgt die Wasserspiegeldifferenz sogar noch über 20 cm (siehe Abbildung 3-39). Insgesamt fällt die Differenz im Vergleich zu den anderen Simulationsläufen jedoch geringer aus. Auch die Ausbreitung der Überschwemmungsflächen stimmt nun mehr mit dem Hydro_AS-2D-Modell überein. Einige Abweichungen sind zwar nach wie vor vorhanden, jedoch können diese auch aus den Abweichungen des Geländemodells resultieren.

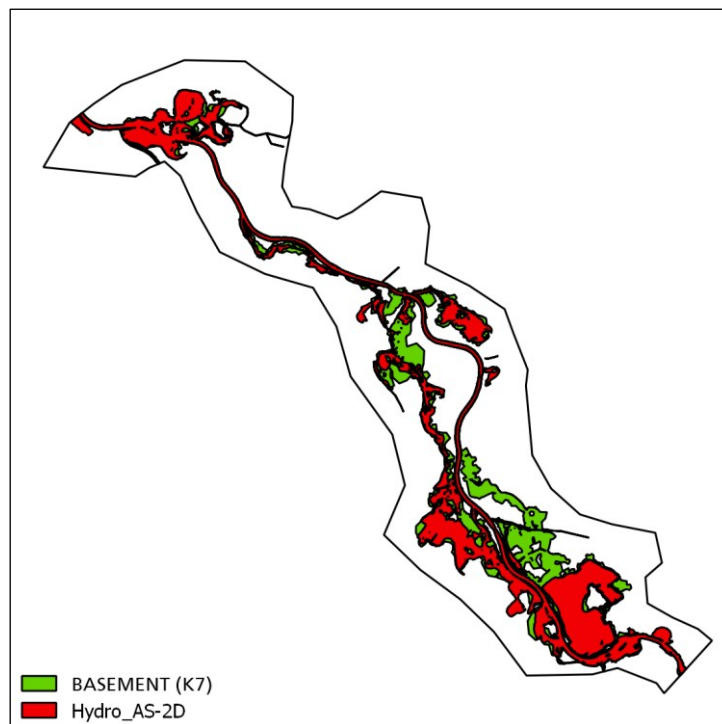


Abbildung 3-38: Vergleich der Überschwemmungsflächen zwischen BASEMENT (K7) und Hydro_AS-2D

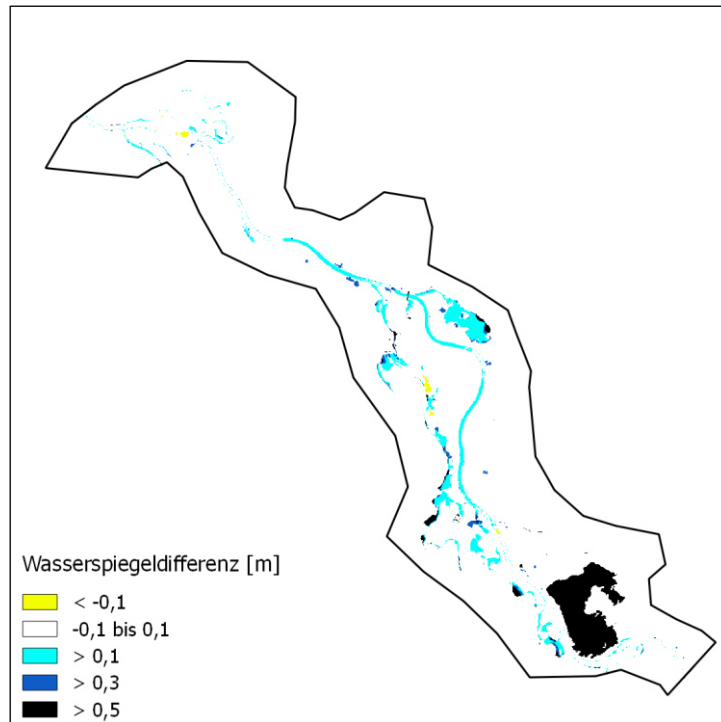


Abbildung 3-39: Wasserspiegeldifferenz zwischen BASEMENT (K7) und Hydro_AS-2D

Fazit

Durch eine Variation der k_{st} -Werte kann der Wasserspiegel und damit auch die Ausdehnung der Überschwemmungsflächen beeinflusst werden. Die Sensitivität fällt diesbezüglich im Vergleich zu Hydro_AS-2D geringer aus. Um den gemessenen Wasserspiegel am Pegel zu erreichen, müssten die k_{st} -Werte deutlich erhöht werden. Selbst bei einer Erhöhung um 20 % liegt der Wasserspiegel in BASEMENT noch immer 8 cm höher. Bei einer weiteren Erhöhung wäre es fraglich, ob die Werte noch in einem plausiblen Bereich liegen würden. Möglicherweise müsste auch eine Netzanpassung durchgeführt werden, um die in Abschnitt 3.3 erwähnten kritischen Stellen zu bereinigen. Eine exakte Kalibrierung des Modells war jedoch, wie bereits erwähnt, kein vorrangiges Ziel, sodass auf diese Schritte verzichtet wurde.

Die Sensitivitätsanalyse hat außerdem gezeigt, dass die Definition des Auslaufrands den Wasserspiegel am Pegel beeinflusst. Der Typ des Riemann-Lösers erwies sich dagegen nicht als sensibler Parameter. Auch das Hinzuschalten des Turbulenzmodells hatte keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.

3.5 Anwendung auf Test-Cases

Zusätzlich zu dem realen Fallbeispiel wurden die Programme BASEMENT und Hydro_AS-2D auf zwei aus der Literatur bekannte Test-Cases angewendet. Anhand solcher Test-Cases kann die Qualität der eingesetzten Lösungsverfahren überprüft werden. Es liegen zum Teil analytische und experimentelle Lösungen vor, mit denen die berechneten Ergebnisse verglichen werden können.

Der erste betrachtete Test-Case trägt den Titel „Circular dam break wave“, für welchen eine Referenzlösung nach Toro (2001) vorliegt. Mit diesem Test-Case kann die Fähigkeit beider Programme, Stoß- und Verdünnungswellen abzubilden, überprüft werden. Die Berechnungen zu diesem Test-Case wurden außerdem mit jeweils zwei Netzen unterschiedlicher Auflösung durchgeführt. Der zweite Test-Case trägt den Titel „Three humps“. Bei einer komplexen Topographie kann hier die Abbildung diskontinuierlicher Strömungsgrößen sowie der Übergang von trockenen zu nassen Elementen analysiert werden (Vanzoa, Siviglia und Toro 2016, 17).

Test-Case 1: Circular dam break wave

Bei diesem Test-Case wird ein kreisförmiger Dammbruch simuliert. Der virtuelle Damm befindet sich im Zentrum der Domain und wird zum Startzeitpunkt der Simulation entfernt. Die Initialwassertiefe beträgt im Zentrum (im Bereich des Damms) 2,5 m, innerhalb der restlichen Domain liegt sie bei 0,5 m. Die Abmessung der Domain beträgt 40 m x 40 m. Die Berechnungen wurden mit zwei Netzen unterschiedlicher Auflösung durchgeführt. Bei dem Netz handelt es sich jeweils um ein unstrukturiertes Dreiecksnetz. Das gröbere Netz besteht aus 50.797 Elementen, das feinere Netz aus 159.231 Elementen. Die Simulationen wurden über eine Dauer von 20 s durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit einer Zeitschrittweite von 1 s ausgegeben. Es ist anzumerken, dass bei Hydro_AS-2D die Ausgabe zum Teil mit einem Versatz von 10 bis 40 Millisekunden erfolgt. Als Vergleich liegen Referenzlösungen der Wasserspiegelauslenkungen nach Toro (2001) zu den Zeitschritten von 1 s, 4 s und 5 s vor.

In Abbildung 3-40 ist der Zustand zu Beginn der Simulation dargestellt. Die detaillierte Auswertung ist Anhang A.1 zu entnehmen. Der Verlauf der Wasserspiegelauslenkung ist in BASEMENT wesentlich kontinuierlicher als in Hydro_AS-2D. In Hydro_AS-2D kommt es an einigen Stellen zu Unstetigkeiten. Im Vergleich zur Referenzlösung nach Toro kommt es in beiden Programmen zu Abweichungen. Insbesondere im Bereich der lokalen Maxima liegt der mit BASEMENT berechnete Wasserspiegel oftmals unterhalb der Referenzlösung. Die Berechnungsergebnisse von Hydro_AS-2D weisen auch im Vergleich zur Referenzlösung deutliche Sprünge auf.

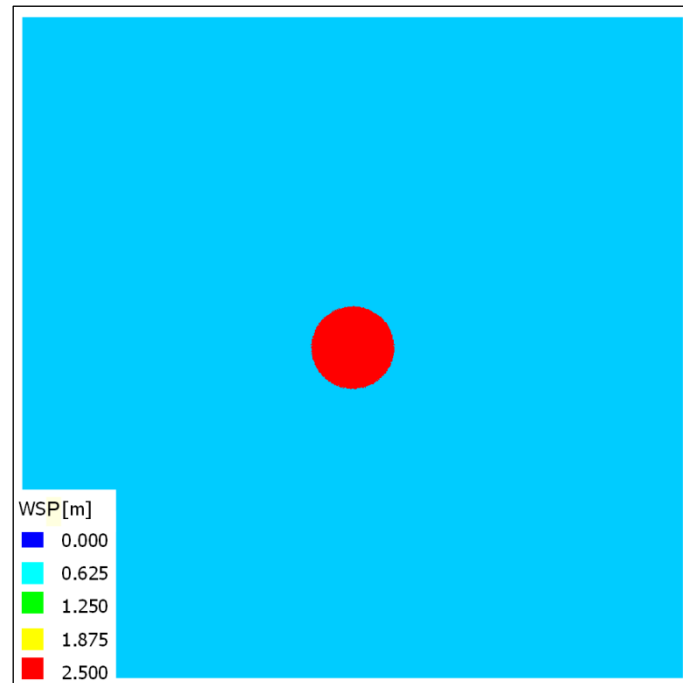


Abbildung 3-40: Anfangszustand für Test-Case 1

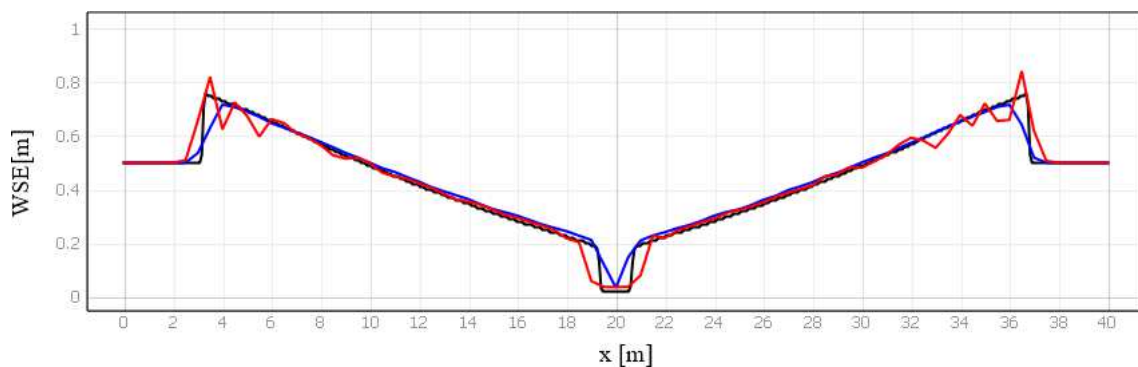
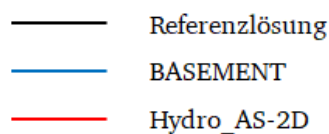


Abbildung 3-41: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain für das grobe Netz zum Zeitpunkt $t=4s$



Bei Wiederholung der Berechnungen mit dem feineren Netz bleiben die beobachteten Effekte grundsätzlich bestehen, die Abweichung zur Referenzlösung wird jedoch in beiden Programmen deutlich geringer. Die Berechnungsergebnisse von BASEMENT liegen nun insgesamt näher an der Referenzlösung. In Hydro_AS-2D sind an einigen Stellen nach wie vor Sprünge im Verlauf zu erkennen. Insbesondere fällt auf, dass sowohl die Wasserspiegelabsenkung im Zentrum zum Zeitpunkt $t=4s$ als auch die Wasserspiegelanhebung infolge der zweiten nach innen laufenden Stoßwelle zum Zeitpunkt $t=5s$ in Hydro_AS-2D deutlich breiter ausfällt als in der Referenzlösung (siehe hierzu auch

Anhang A.1 Abbildung A-2 bis Abbildung A-10). In BASEMENT stimmt die Ausdehnung sehr gut mit der Referenzlösung überein.

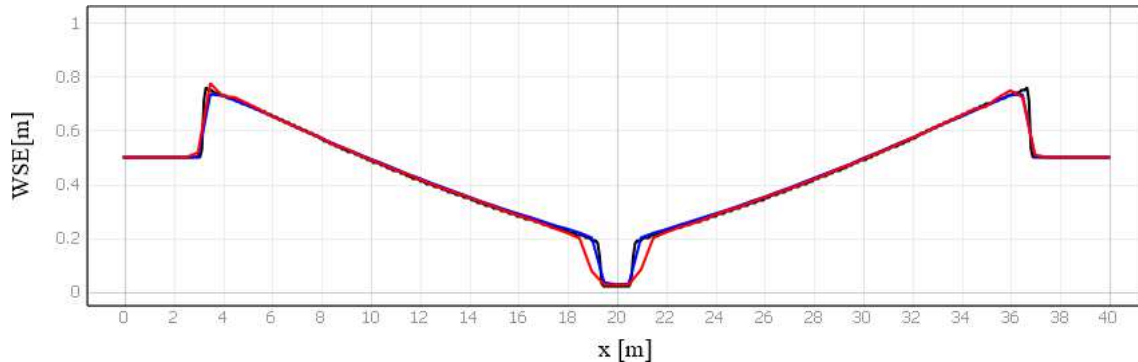


Abbildung 3-42: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain für das feine Netz zum Zeitpunkt $t=4s$

Test-Case 2: Three humps

Bei diesem Test-Case handelt es sich ebenfalls um ein Dammbrechungsproblem, welches häufig als Benchmark-Test für die Robustheit von numerischen Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichungen eingesetzt wird. Der virtuelle Damm befindet sich am seitlichen Rand der Domain und wird zum Startzeitpunkt der Simulation entfernt. Die Initialwassertiefe beträgt im Bereich des Damms 1,875 m. Die restliche Domain befindet sich in einem trockenen Anfangszustand. Die Abmessung der Domain beträgt 75 m x 30 m. Bei dem Netz handelt es sich erneut um ein unstrukturiertes Dreiecksnetz und besteht aus 19.262 Elementen. Die Simulationen wurden über eine Dauer von 40 s durchgeführt. Für diesen Test-Case liegt keine Referenzlösung vor. Die Ergebnisse wurden zu den Zeitschritten 2 s, 6 s und 18 s verglichen (siehe Anhang A.1 Abbildung A-13 bis Abbildung A-23.)

In Abbildung 3-43 ist die Topographie dargestellt. In BASEMENT wird trockenen Knoten als Wasserspiegelauslenkung die Geländehöhe zugewiesen. In Hydro_AS-2D hingegen wird ihnen der Wert Null zugewiesen. Um eine einheitliche Visualisierung zu ermöglichen, werden daher die Wassertiefen statt der Wasserspiegel verglichen. In Abbildung 3-44 ist die Initialwassertiefe dargestellt.

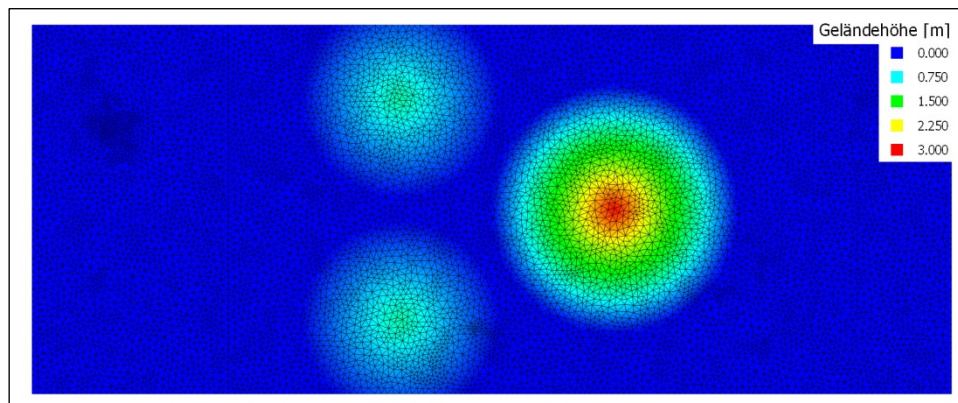


Abbildung 3-43: Geländehöhe für Test-Case 2



Abbildung 3-44: Initialwassertiefe für Test-Case 2

Die detaillierte Auswertung ist ebenfalls Anhang A.1 zu entnehmen. Im Hydro_AS-2D-Modell fallen erneut Sprünge im Verlauf der Wassertiefe auf, welche in dieser Ausprägung im BASEMENT-Modell nicht vorhanden sind. Besonders deutlich wird dies beim Zeitschritt von 18 s im markierten Querschnitt. Bei zwei weiteren Schnitten durch die Domain ergibt sich für alle Zeitschritte in beiden Modellen ein recht ähnlicher Verlauf der Wassertiefe.

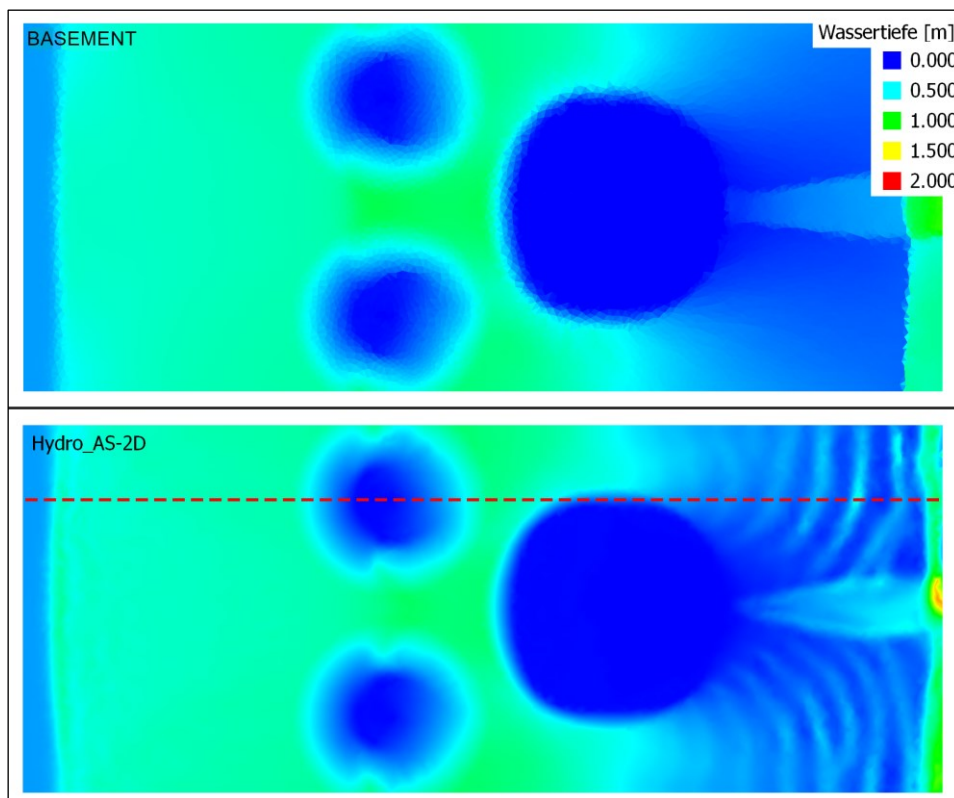


Abbildung 3-45: Wassertiefe zum Zeitpunkt $t=18s$

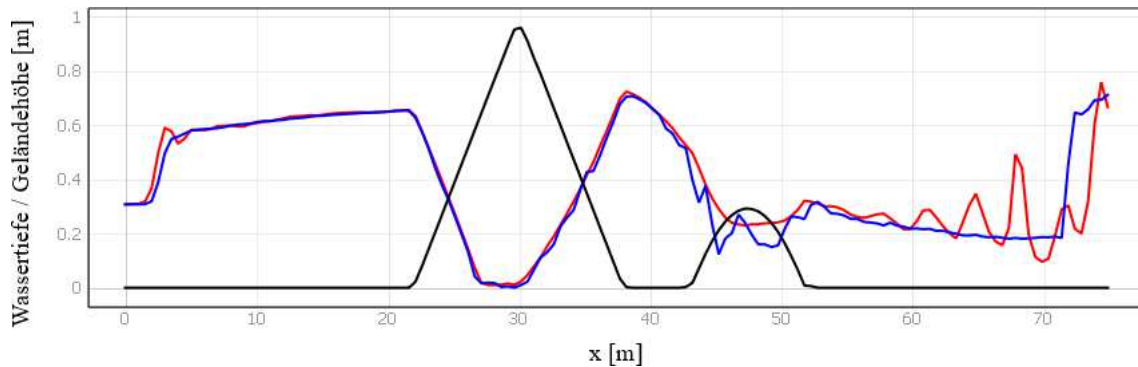
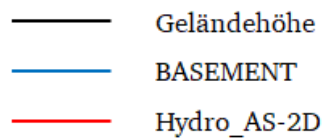


Abbildung 3-46: Wassertiefe bzw. Geländehöhe zum Zeitpunkt $t=18s$ im markierten Querschnitt



Fazit

In BASEMENT wird der Verlauf des Wasserspiegels über weite Strecken deutlich stetiger abgebildet. In Hydro_AS-2D treten an einigen Stellen Sprünge auf. Bezüglich Test-Case 1 liegen die Berechnungsergebnisse des BASEMENT-Modells näher an der Referenzlösung nach Toro (2001). Für Test-Case 2 liegt keine Referenzlösung vor. Insgesamt liegen die Ergebnisse beider Modelle hier näher beieinander. An einigen Stellen treten im Hydro_AS-2D-Modell jedoch erneut Unstetigkeiten im Verlauf der Wassertiefe auf, welche im BASEMENT-Modell in dieser Ausprägung nicht vorhanden sind.

3.6 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Anwendung auf das reale Fallbeispiel musste bei der Erstellung des BASEMENT-Modells in einigen Punkten vom bestehenden Hydro_AS-2D-Modell abgewichen werden. Zum einen musste die Anzahl der Elemente verringert werden, um die derzeitige Obergrenze von BASEmesh nicht zu überschreiten. Hierdurch ist die Auflösung des BASEMENT-Modells an einigen Stellen gröber als im Hydro_AS-2D-Modell. Eine weitere Abweichung besteht in der Abbildung von Durchlässen im Modellgebiet. Mit den derzeitigen Optionen von BASEMENT konnten die Durchlässe nicht in das Modell integriert werden. Die Erstellung des Flussschlauches aus den Querprofilen konnte mit BASEmesh nicht durchgeführt werden. Die Höheninformationen in diesem Bereich wurden aus dem Hydro_AS-2D-Netz übernommen.

Es wurden insgesamt vier verschiedene Abflüsse simuliert. Bei allen Simulationen traten zum Teil deutliche Abweichungen zwischen beiden Modellen auf. Im BASEMENT-Modell ist die Wasserspiegelauslenkung sowie die Ausdehnung der Überschwemmungsflächen (bei identischen k_{st} -Werten) stets größer als im Hydro_AS-2D-Modell. Zudem liegt der Wasserspiegel am Pegel stets über der Abflusskurve 120. Mit steigendem Abfluss werden die Abweichungen geringer.

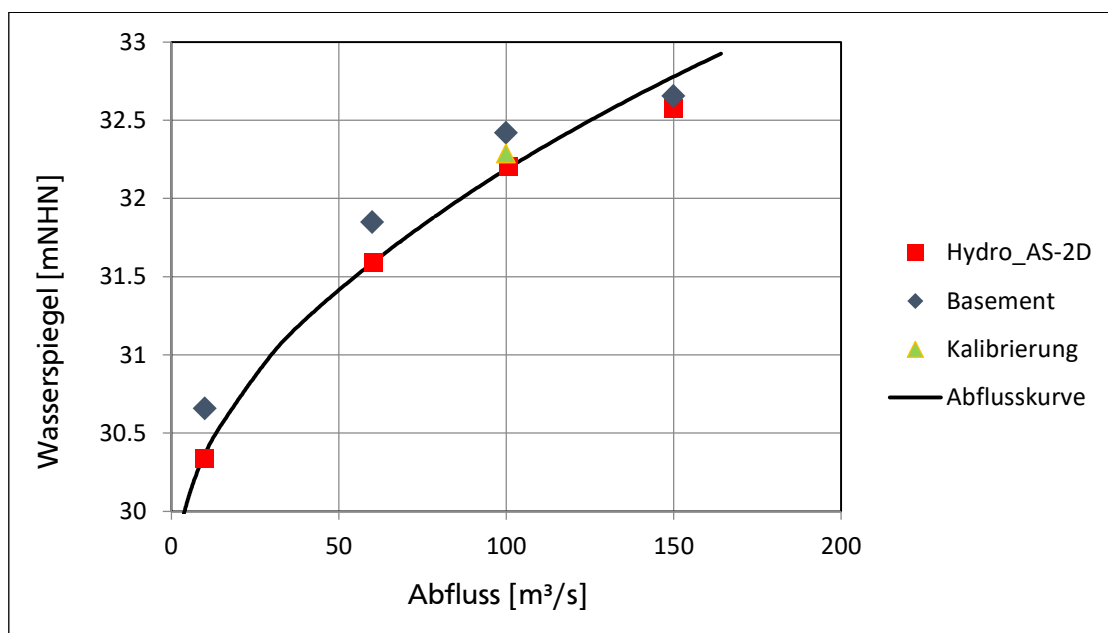


Diagramm 5: Wasserspiegel Pegel Stah

Wie aus der Sensitivitätsanalyse hervorgeht, müssten die k_{st} -Werte deutlich erhöht werden, um den gemessenen Wasserspiegel am Pegel zu treffen. Selbst eine Erhöhung der k_{st} -Werte um 20 % - im Rahmen der Kalibrierung - führt noch zu keiner ausreichenden Reduktion (siehe Diagramm 5). An einigen Stellen hat die Netzauflösung noch einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse. Möglicherweise würden weitere Anpassungsmaßnahmen an den betroffenen Stellen zu anderen Ergebnissen führen. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht mehr überprüft. Eine weitere

Erkenntnis aus der Sensitivitätsanalyse ist, dass die Variation der k_{st} -Werte insgesamt einen geringeren Einfluss auf die Ergebnisse hat als im Hydro_AS-2D-Modell. Es wurde weiterhin festgestellt, dass die Definition der Randbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse bis ca. 750 m ins Modellinnere haben kann.

Es sei an dieser Stelle nochmal darauf hingewiesen, dass bezüglich der Ausdehnung der Überschwemmungsflächen keine genauen Messwerte vorliegen. Daher kann keine Aussage darüber getroffen werden, in welchem Modell diese besser abgebildet werden.

Darüber hinaus zeigt die Anwendung auf die aus der Literatur bekannten Test-Cases, dass die Ergebnisse aus BASEMENT besser mit der Referenzlösung übereinstimmen. Die Ergebnisse aus Hydro_AS-2D weisen an einigen Stellen zum Teil starke Unstetigkeiten auf.

4 Beurteilung der Anwendbarkeit von BASEMENT im Vergleich zu Hydro_AS-2D

In der Ingenieurpraxis spielen in Anbetracht einer schnellen und effizienten Projektabwicklung Aspekte der Anwendbarkeit einer Modellierungssoftware eine entscheidende Rolle. Neben der Qualitäten und Möglichkeiten hinsichtlich der Pre- und Postprocessing-Werkzeuge ist auch der generelle Workflow sowie die Anzahl der erforderlichen Bearbeitungsschritte von Bedeutung. Im Folgenden wird daher noch einmal näher auf diese Aspekte eingegangen.

4.1 Pre- und Postprocessing-Werkzeuge

BASEMENT verfügt mit BASEmesh über ein eigenes integriertes Preprocessing-Tool. Das QGIS-Plugin kann für die Netzerstellung und die Netzbearbeitung verwendet werden. Die durchzuführenden Schritte wurden bereits in Abschnitt 3.2.1 detailliert beschrieben. In Abbildung 4-1 ist noch einmal der Workflow in BASEmesh schematisch dargestellt. Es werden separat Elevation Mesh und Quality Mesh erstellt. Die Höheninformationen aus dem Elevation Mesh oder dem DGM werden über die Knoten des Quality Meshs interpoliert. Die interpolierten Knoten werden zusammen mit den Elementen aus dem Quality Mesh in eine 2dm-Datei exportiert.

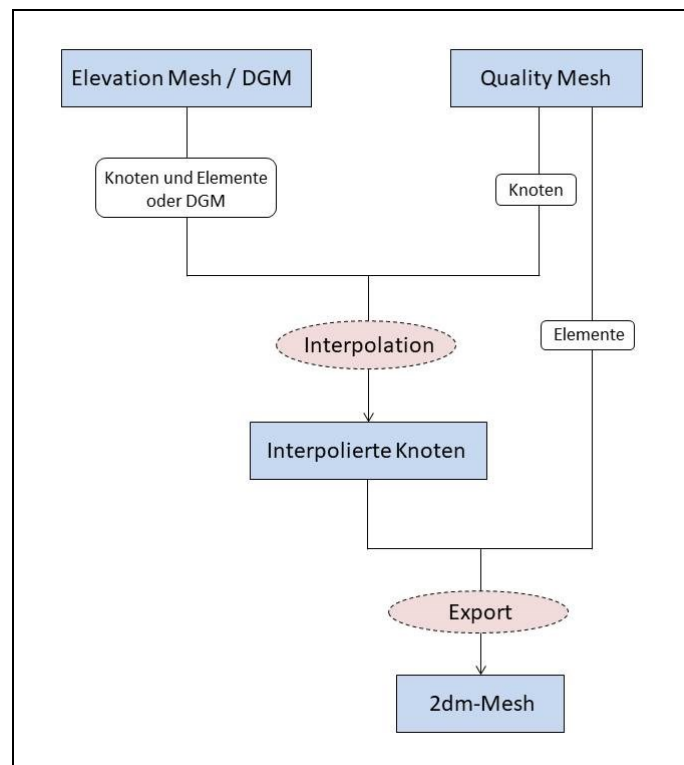


Abbildung 4-1: Workflow in BASEmesh

Das Netz wird ohne Trennung von Flussschlauch und Vorland für das gesamte Gebiet generiert. Die praktische Anwendbarkeit der Erstellung des Elevation Meshs ist derzeit noch eingeschränkt. Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erläutert, lassen sich die Höheninformationen aus zwei benachbarten Querprofilen nur entlang von geraden Linien interpolieren, wodurch die Geometrie des Flussschlauchs nur bei sehr hoher Profildichte genau genug wiedergegeben werden kann. Hinsichtlich der Generierung des Quality Meshs besteht die Einschränkung, dass alle abzubildenden Bruchkanten manuell in einem Layer übergeben werden müssen. Es müssen also alle relevanten Bruchkanten als Shape-Datei vorliegen, da keine automatische Erkennung von Bruchkanten erfolgt. Diese müssen zuvor manuell zusammengeführt werden. Dafür lassen sich über die Möglichkeit der Definition von Regionen gleicher Eigenschaften Parameter wie die Netzauf-

lösung bereichsweise beeinflussen. Jedoch ist auch hier die Definition der Bereiche über Bruchkanten erforderlich.

Die Einbindung von Bauwerken ins Netz ist über die Definition interner Randbedingungen möglich. Diese müssen in BASEmesh von Bruchkanten umgeben sein, um die darin liegenden Elemente aus dem Netz heraus schneiden zu können. Die eigentliche Definition der Randbedingungen findet erst in BASEMENT statt. Es müssen dazu lediglich die Knoten auf der Zu- und Abstromseite übergeben werden. Dazu gibt es in BASEmesh ein eigenes Werkzeug „stringdef“, welches die Knoten entlang von gekennzeichneten Bruchkanten in eine Textdatei schreibt. Die Kennzeichnung erfolgt, indem den Bruchkanten der Zu- und Abstromseite ein Attribut übergeben wird. Das Werkzeug stringdef schreibt dann die Knoten entlang aller Bruchkanten, denen ein solches Attribut zugewiesen wurde, heraus.

Die Zuweisung einer Material ID kann entweder über die Regionpunkte, direkt in QGIS oder über alternative Bearbeitungssoftware (bspw. SMS) erfolgen. Die Zuweisung über QGIS kann bei einer großen Anzahl an Elementen sehr zeitintensiv sein.

In Hinblick auf die Anwendbarkeit auf große Gebiete besteht zurzeit noch eine Einschränkung hinsichtlich der Netzauflösung. Ab einer Anzahl von mehr als ca. 500.000 Elementen werden sehr lange Rechenzeiten sowohl für die Netzerstellung als auch für die Interpolation erreicht.

Für **Hydro_AS-2D** erfolgt die Netzerstellung üblicherweise über die Zusatzmodule Laser_AS und Flussschlauchgenerator. Das Netz wird somit für Vorland und Flussschlauch separat erstellt und anschließend zusammengeführt. Mithilfe des Flussschlauchgenerators kann die Geometrie des Flussschlauchs durch Interpolation entlang von Stromlinien sehr exakt abgebildet werden. Das Modul Laser_AS besitzt zudem den Vorteil, dass Bruchkanten automatisch aus dem DGM erkannt werden können. Alle weiteren Netzbearbeitungsschritte müssen mit der Software SMS durchgeführt werden.

Hinsichtlich des Postprocessings bietet **BASEMENT** mehrere Möglichkeiten. So stehen zahlreiche verschiedene Output-Formate zur Verfügung. Die Ergebnisse können sowohl im SMS-Format für die Visualisierung mit SMS oder dem QGIS-Plugin Crayfish als auch im vtk-Format für die Visualisierung mit dem umfangreichen Programm Paraview ausgegeben werden. Daneben stehen weitere Formate wie ASCII (Text-Format), Shape (für QGIS oder ArcGIS) oder tecplot (für Tecplot) zur Verfügung. Es können zudem sogenannte BASEviz-Dateien ausgegeben werden, welche eine Visualisierung in BASEMENT direkt während der Berechnung ermöglichen. Die Zeitschrittweite kann für jedes Output-Format separat definiert werden. Die Ergebnisse können zudem wahlweise auf die Knoten (node-centered) oder auf die Elemente (element-centered) geschrieben werden. Falls bestimmte Stellen im Netz beobachtet werden sollen, können zusätzliche Ergebnisdateien für definierte Knoten, Elemente, Kanten oder Randbedingungen erstellt werden. Einen nützlichen Output für die Ermittlung kritischer Elemente im Netz stellt der sogenannte balance-Output dar. In einer Textdatei wird jeweils das Element ausgegeben, welches den Zeitschritt beschränkt. Hierdurch können gezielte Netzanpassungen vorgenommen werden. Als Parameter der Ergebnisdateien können neben Wassertiefe

und Geschwindigkeit auch Wasserspiegel, Geländehöhe, Impuls und viele weitere ausgewählt werden. Des Weiteren wird bei jeder Berechnung ein Restart-File mit definierbarer Zeitschrittweite erzeugt. Dadurch kann die Berechnung zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden.

Die Postprocessing- und Visualisierungsoptionen sind somit sehr umfangreich. Durch die Möglichkeit, für jeden Output-Typ eine eigene Zeitschrittweite zu definieren, kann die erzeugte Datenmenge und damit auch die Rechendauer so gering wie möglich gehalten werden.

Für **Hydro_AS-2D** kann das Postprocessing mittels SMS oder QGIS-Crayfish erfolgen. Die Ausgabedateien von Hydro_AS_2D bestehen aus mehreren ASCII-Dateien im SMS-Format. Dazu zählen neben Wassertiefe, Geschwindigkeit und Wasserspiegel auch bspw. der maximale Wasserspiegel oder die maximal erreichte Schubspannung für jeden Knoten während der gesamten Berechnung. Die Ergebnisse werden alle auf die Knoten geschrieben. Zusätzlich werden ASCII-Dateien zum Einlesen in Excel (oder ähnliche Programme) ausgegeben. Dazu gehören ermittelte Abflüsse und Wasserspiegel an zuvor definierten Kontrollquerschnitten. Des Weiteren werden ASCII-Dateien, die die berechneten Abflüsse an Bauwerken enthalten, erstellt. Zum Fortsetzen eines vorherigen Rechenlaufs wird eine separate Datei ausgegeben. Unter Hinzunahme des Zusatzprogramms Contour-fill können Ergebnisdatensätze auch im DXF- oder im Shape-Format exportiert werden.

4.2 Programmbedienung

Die Bedienung von **BASEMENT** erfolgt über eine graphische Benutzeroberfläche. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, kann ein Datensatz durch Hinzuschalten verschiedener Blöcke und Parameter anhand einer Baumstruktur erstellt werden. Die Blöcke und Parameter können über Dropdown-Menüs ausgewählt werden. Die Erstellung ist somit sehr intuitiv und unkompliziert. Sind in dem erstellten Datensatz noch Fehler enthalten, wird dies farblich gekennzeichnet und es werden Warnungen mit den entsprechenden Hinweisen ausgegeben (siehe Abbildung 4-2).

Die Definition der Randbedingungen erfolgt durch die Übergabe einer Liste der entsprechenden Knoten im Netz. Diese Liste kann bereits beim Preprocessing mit BASEmesh unter Verwendung des stringdef-Werkzeugs erzeugt werden. Auch die Definition der Rauheit erfolgt listenbasiert. Es muss eine Liste mit den Material-IDs und eine Liste mit den zugehörigen Rauheitsbeiwerten übergeben werden. Zuvor muss der gewünschte Berechnungsansatz (bspw. Strickler, Manning, Chezy) ausgewählt werden. Hinsichtlich der Randbedingungen muss bspw. für den Zufluss eine Textdatei erstellt werden, in welcher der Abfluss in Abhängigkeit von der Zeit definiert ist. Diese Datei kann jedoch auch in BASEMENT direkt bearbeitet werden (siehe Abbildung 4-3). Für interne Randbedingungen wie Bauwerke muss eine ähnliche Datei erstellt werden, welche bspw. die Bauwerksöffnungshöhe in Abhängigkeit von der Zeit enthält.

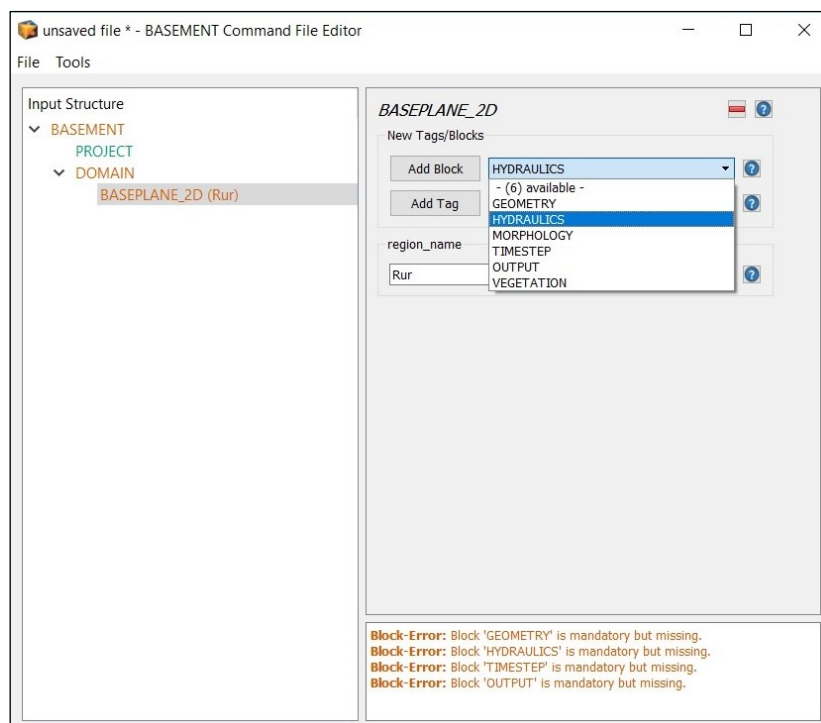


Abbildung 4-2: Erstellung eines Datensatzes mit BASEMENT (automatische Warnungsausgabe aufgrund eines unvollständigen Datensatzes)

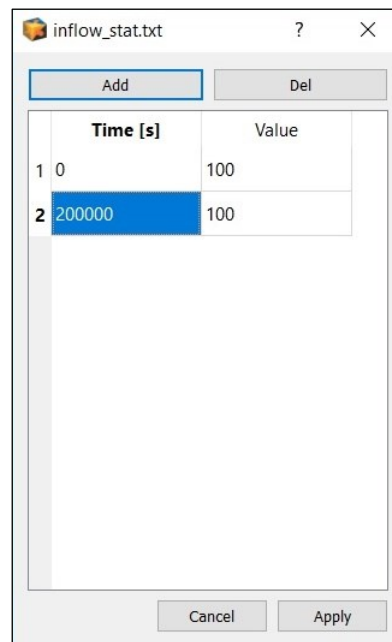


Abbildung 4-3: Bearbeitung der Zuflussganglinie in BASEMENT

Soll bspw. eine vorherige Berechnung fortgesetzt werden, ist dies in BASEMENT durch die Übergabe eines Restart-Files möglich. Der Restart-File wird automatisch bei der Berechnung erstellt. Wird dieser in BASEMENT eingeladen, kann die Berechnung ab einem wählbaren Zeitschritt fortgesetzt werden.

Die Zwischenergebnisse können zu definierbaren Zeitschritten auf der Konsole angezeigt werden. Hierdurch kann der Fortschritt der Berechnung stetig überprüft werden. Außerdem werden in einem separaten Fenster Warnungen ausgegeben, wenn bspw. noch kritische Elemente im Netz vorhanden sind (siehe Abbildung 4-4). Der RTS-Wert zeigt den aktuellen Umrechnungsfaktor zwischen simulierter Zeit und realer Zeit an. Ein Wert von 2 bedeutet beispielsweise, dass zwei simulierte Stunden eine Stunde Rechenzeit benötigen.

BASEMENT bietet außerdem die Möglichkeit, die Ergebnisse bereits während der Berechnung zu visualisieren. Dazu muss ein Output vom Typ BASEviz definiert werden. Dies ist bspw. sehr nützlich, um die Simulation bereits auf den ersten Blick auf Plausibilität überprüfen zu können.

Hydro_AS-2D verfügt über keine eigene graphische Benutzeroberfläche (bezieht sich auf Version 2.2.2; seit Version 5.0 gibt es eine grafische Benutzeroberfläche). Es ist in das Programm SMS eingebunden. Die meisten notwendigen Definitionen werden hier vorgenommen. Das eigentliche Programm Hydro_AS-2D besteht aus den beiden Modulen Hydro_2DM und Hydro_AS. Hydro_2DM bereitet die Ausgabedateien aus SMS auf, sodass sie in Hydro_AS eingelesen werden können. Es findet zudem eine Qualitätsprüfung mit gegebenenfalls entsprechender Warnhinweisausgabe statt. Die erstellten Ausgabedateien enthalten Informationen über das Gelände, die Rauheit und die Randbedingungen. Hydro_AS stellt das eigentliche Berechnungsmodul dar. Es verfügt über keine Benutzeroberfläche und muss über die Windowsoberfläche oder von der DOS-Ebene

gestartet werden. Als Eingangsdateien werden die zuvor mit Hydro_2DM erstellten Dateien benötigt.

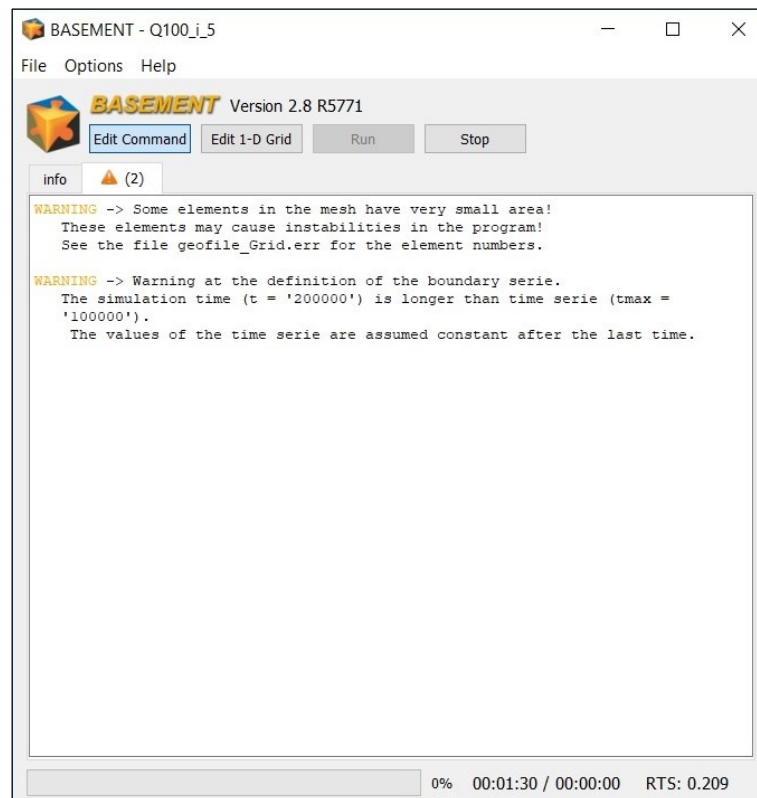


Abbildung 4-4: Ausgabe von Warnungen während der Berechnung

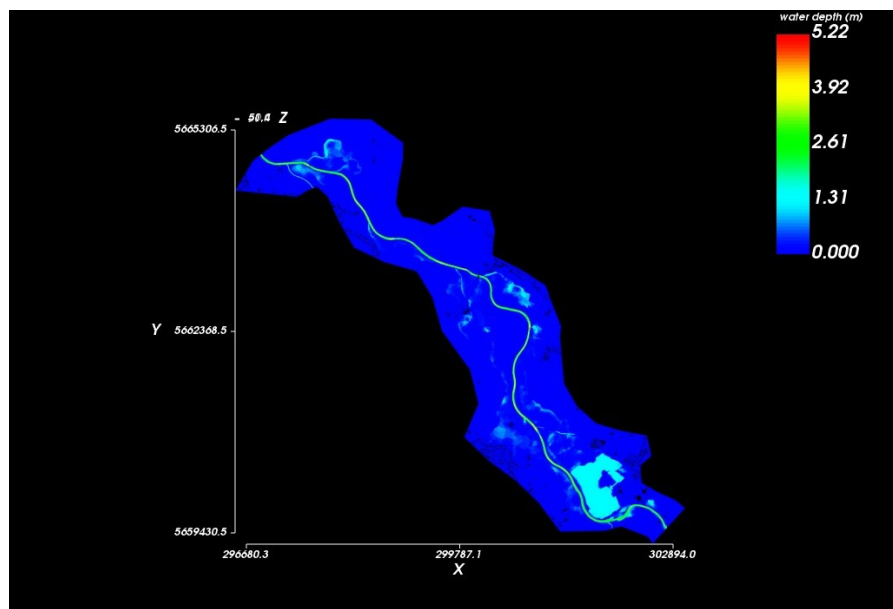


Abbildung 4-5: Visualisierung mit BASEviz

4.3 Schnittstellen zu anderer Software

Durch die Output-Optionen von **BASEMENT** besteht die Möglichkeit der Analyse und Weiterverarbeitung der BASEMENT-Dateien mit zusätzlicher Software. Hinsichtlich des Postprocessings besteht u.a. eine Schnittstelle zu QGIS-Crayfish, SMS, Paraview und Tecplot. Die Visualisierungsmöglichkeiten sind somit sehr umfangreich. Hinsichtlich des Preprocessings ist durch die Tatsache, dass die 2dm-Datei, die in BASEMENT eingeladen wird, keine programmspezifischen Informationen enthält, eine Netzbearbeitung auch mit anderer Software wie SMS oder Blue Kenue möglich. Die 2dm-Datei enthält lediglich die Elemente mit ID und den zugehörigen Knoten sowie die Knoten mit ID und den x-, y-, und z-Werten. Alle programmspezifischen Informationen (wie bspw. die Randbedingungen oder die Verteilung der Rauheit) werden direkt in BASEMENT definiert. Dies ermöglicht somit weit über die in BASEmesh verfügbaren Optionen hinausgehende Bearbeitungsmöglichkeiten.

Hydro_AS-2D ist direkt an SMS gekoppelt. Die Netzbearbeitung sowie sämtliche Voreinstellungen werden dort vorgenommen. Die Visualisierung kann mit SMS oder QGIS-Crayfish erfolgen. Eine Schnittstelle zu weiterer Visualisierungssoftware ist nicht im Softwarepaket enthalten.

5 Diskussion

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit war ein umfassender Vergleich von BASEMENT und Hydro_AS-2D hinsichtlich der numerischen Grundlagen, der Qualität der Ergebnisse sowie der generellen Anwendbarkeit beider Programme. Der Fokus lag hierbei auf der Anwendung im Bereich des Hochwasserrisikomanagements.

Mit BASEMENT liegt ein kostenfrei verfügbares, umfassendes Software-Modellpaket zur hydrodynamischen und morphologischen Modellierung vor, dessen Anwendungsmöglichkeiten noch weit über die hier untersuchten Aspekte hinausgehen. Bei Hydro_AS-2D handelt es sich um kommerzielle Software, die insbesondere in Deutschland häufig eingesetzt wird. Hinsichtlich der numerischen Grundlagen hat sich gezeigt, dass in vielen Bereichen nur geringe Abweichungen zwischen beiden Programmen bestehen. In einigen Punkten (bspw. bei der Berechnung des Reibungsgefälles) sind in BASEMENT sogar komplexere Verfahren integriert. Eine Einschränkung besteht allerdings noch hinsichtlich der Möglichkeit, Bauwerke und Hochwasserschutzmaßnahmen im Modell abzubilden. Hier bietet Hydro_AS-2D mehr Möglichkeiten.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit des Modells auf große Gebiete, wie im behandelten Fallbeispiel, liegen insbesondere bei der Netzerstellung mit dem Preprocessing-Werkzeug BASEmesh noch Defizite vor. Bei der Erstellung eines Netzes auf Basis von Querprofilen sind die integrierten Optionen noch nicht konkurrenzfähig mit dem zum Vergleich herangezogenen Flussschlauchgenerator. Auch die Erstellung des Vorlandnetzes erfordert einen hohen Aufwand, da alle Bruchkanten manuell übergeben werden müssen. Auch hier bietet das Hydrotec-Modul Laser_AS weitaus mehr Möglichkeiten. Schließlich liegt für große Gebiete die Einschränkung einer Obergrenze hinsichtlich der Anzahl der Elemente vor. Ab einem Wert von ca. 500.000 Elementen ist eine Netzgenerierung mit BASEmesh nicht mehr praktikabel. Dies führte bei der Modellanwendung dazu, dass Vereinfachungen hinsichtlich der Geländeabbildung vorgenommen werden mussten, welche die Berechnungsergebnisse beeinflussten. Grundsätzlich ist auch eine Netzerstellung mit einem anderen Preprocessing-Werkzeug möglich, jedoch muss dann die Definition der Randbedingungen genau auf die in BASEMENT implementierten Möglichkeiten abgestimmt werden.

Bei der Modellanwendung auf das reale Fallbeispiel kam es zum Teil zu starken Abweichungen zwischen den Ergebnissen beider Programme. Auch hinsichtlich der Kalibrierungsparameter und deren Ausprägung konnten einige Unterschiede identifiziert werden. So erwies sich beispielsweise die Variation der Rauheit in BASEMENT als weniger sensitiv im Vergleich zu Hydro_AS-2D. Des Weiteren wurde festgestellt, dass in BASEMENT die Definition der Randbedingung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse bis ca. 750 m ins Modellinnere hat. Auffällig ist zudem, dass der Wasserspiegel bei identischer Rauheit in BASEMENT deutlich höher ausfällt als in Hydro_AS-2D. Die Qualität der eingesetzten Lösungsverfahren kann anhand des Praxisbeispiels nur schwer bewertet werden, da keine Kenntnis darüber vorliegt, wie die genaue Ausdehnung der Überschwemmungsflächen in der Realität aussieht. Aus der An-

wendung beider Modelle auf die Test-Cases geht hingegen hervor, dass die Ergebnisse aus BASEMENT näher an der Referenzlösung nach Toro (2001) liegen.

In der Ingenieurspraxis spielen außerdem die Visualisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse eine wichtige Rolle. Beide Programme bieten verschiedene Ausgabeformate und Schnittstellen zu anderer Software an. Hier sind die Möglichkeiten mit BASEMENT vielfältiger als mit Hydro_AS-2D. Ergänzend sei noch angemerkt, dass im Rahmen dieser Arbeit kein Vergleich hinsichtlich der Rechenzeiten durchgeführt werden konnte, da das Hydro_AS-2D-Modell bereits vorlag und alle Simulationen im Vorfeld durchgeführt wurden.

Insgesamt liegt mit BASEMENT somit ein Software-Modellpaket vor, welches hinsichtlich der numerischen Verfahren mit Hydro_AS-2D vergleichbar ist und zum Teil sogar genauere Ergebnisse produziert. Für die Anwendung des Programms im Bereich des Hochwasserrisikomanagements bestehen derzeit jedoch - im Vergleich zu Hydro_AS-2D - noch Defizite bei der Abbildung von Bauwerken und bei der Netzerstellung sowie den zugehörigen Preprocessing-Werkzeugen. Sollten hier in weiteren Versionen neue Optionen integriert werden, könnte BASEMENT zukünftig jedoch möglicherweise auch in diesem Bereich eine kostenfreie Alternative darstellen.

A. Anhang

A.1 Ergebnisse der Test-Cases

Test-Case 1: Circular dam break wave

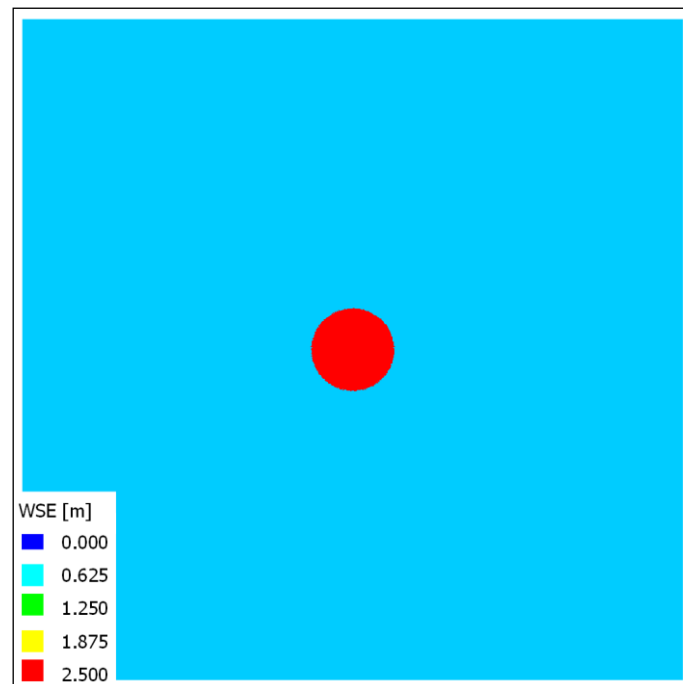


Abbildung A-1: Anfangszustand

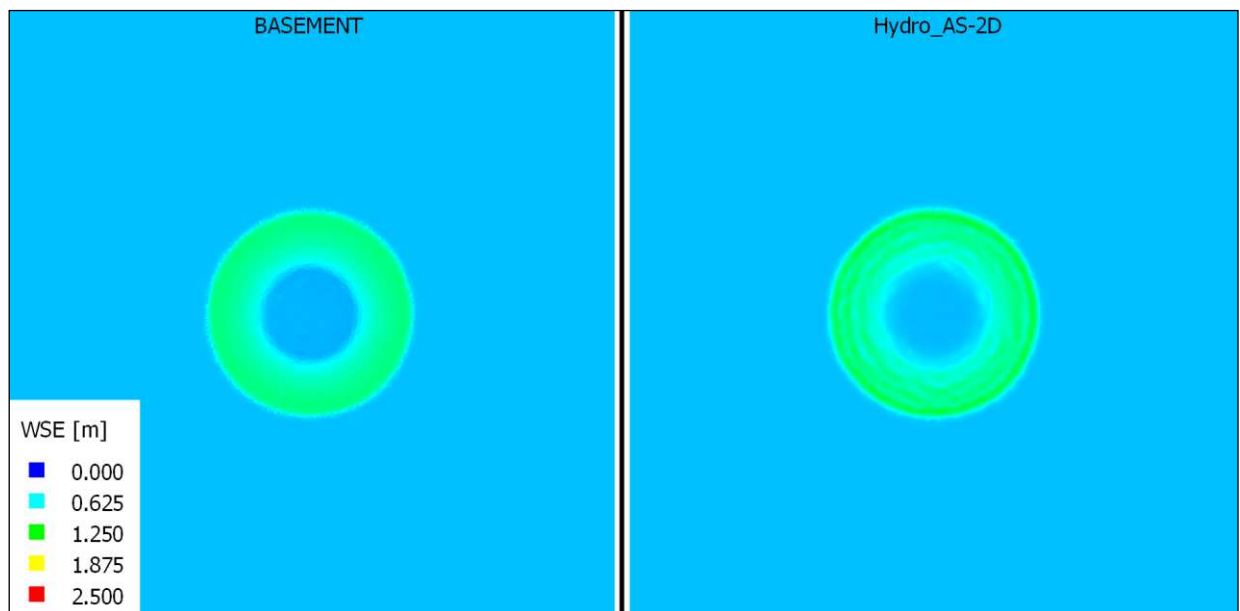


Abbildung A-2: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=1s$

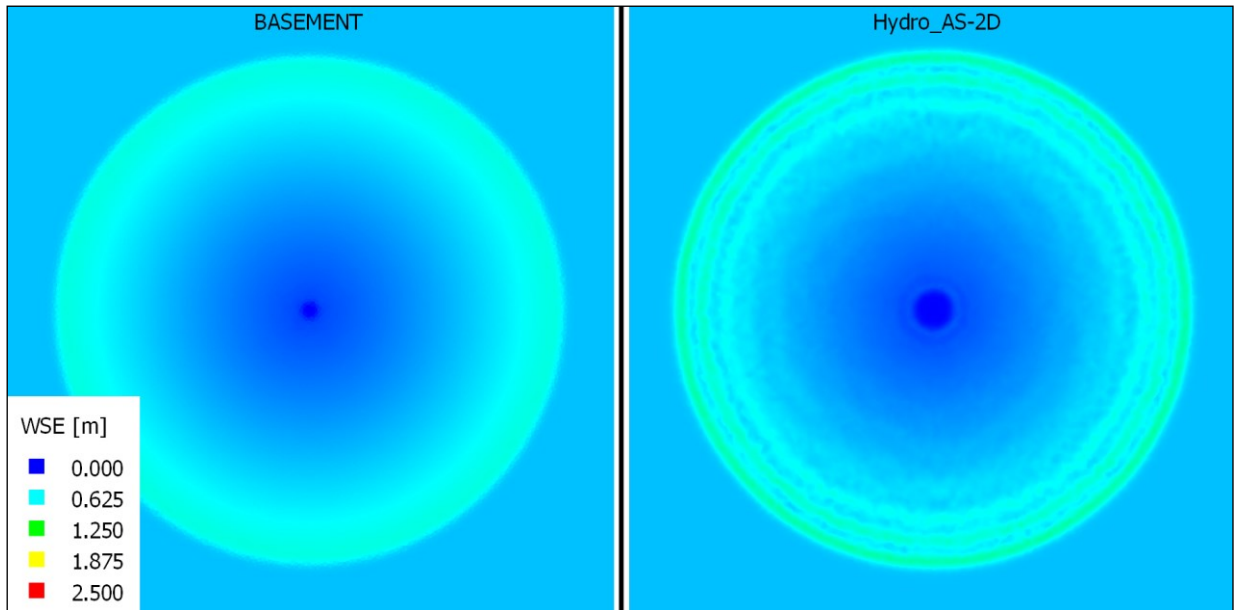


Abbildung A-3: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=4s$

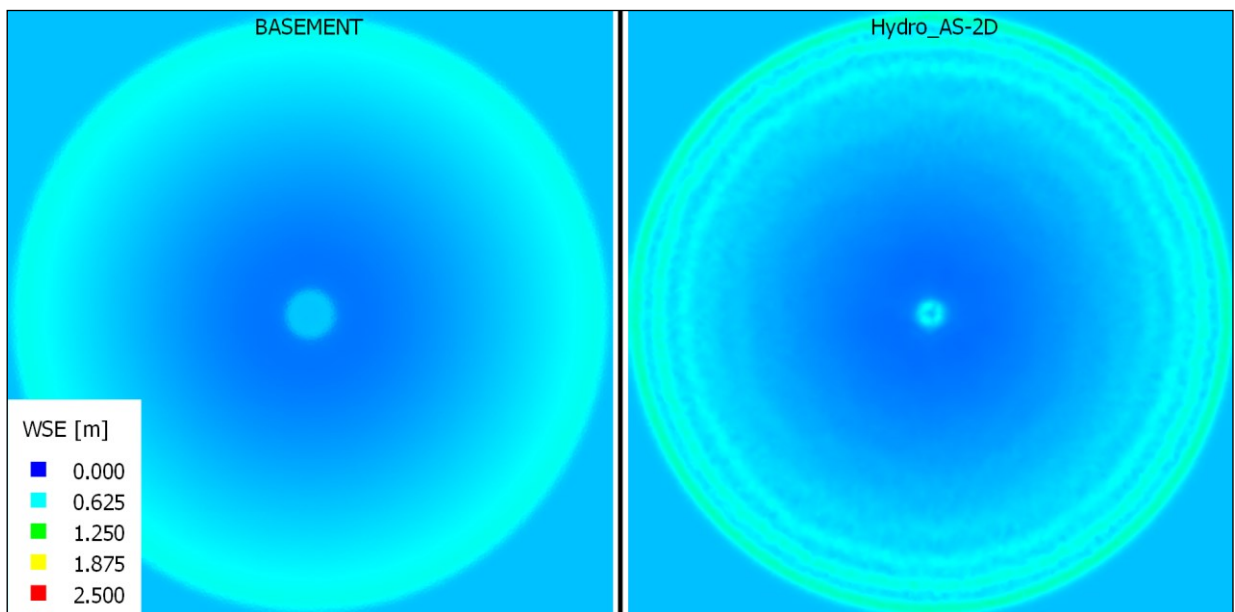


Abbildung A-4: Wasserspiegelauslenkung zum Zeitpunkt $t=5s$

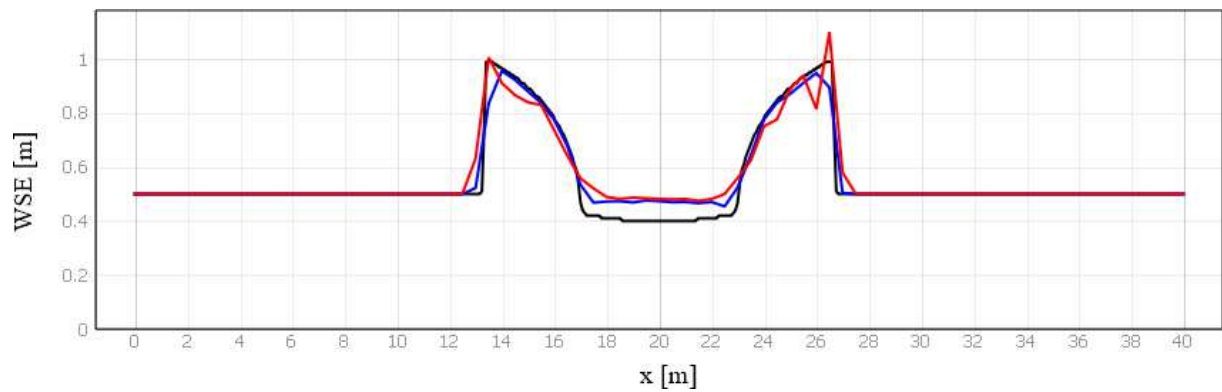


Abbildung A-5: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=1s$ für das grobe Netz

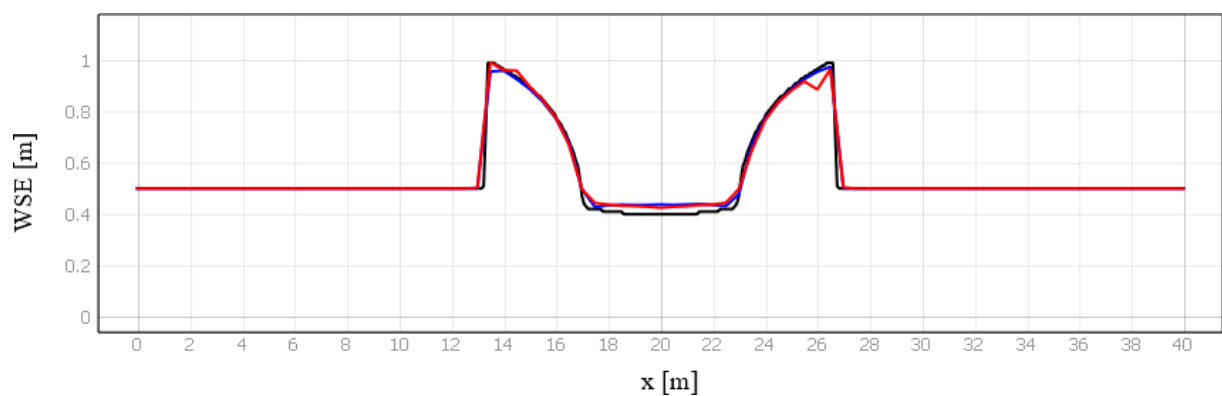


Abbildung A-6: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=1s$ für das feine Netz

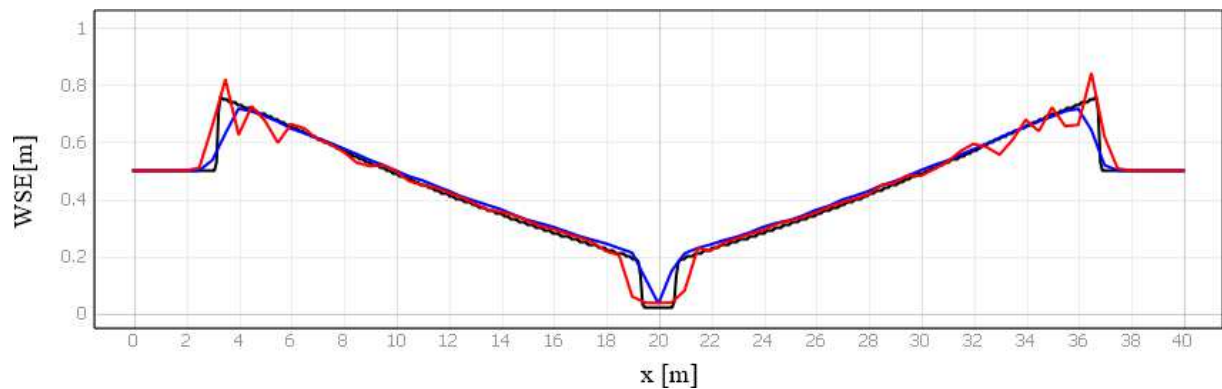


Abbildung A-7: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=4s$ für das grobe Netz

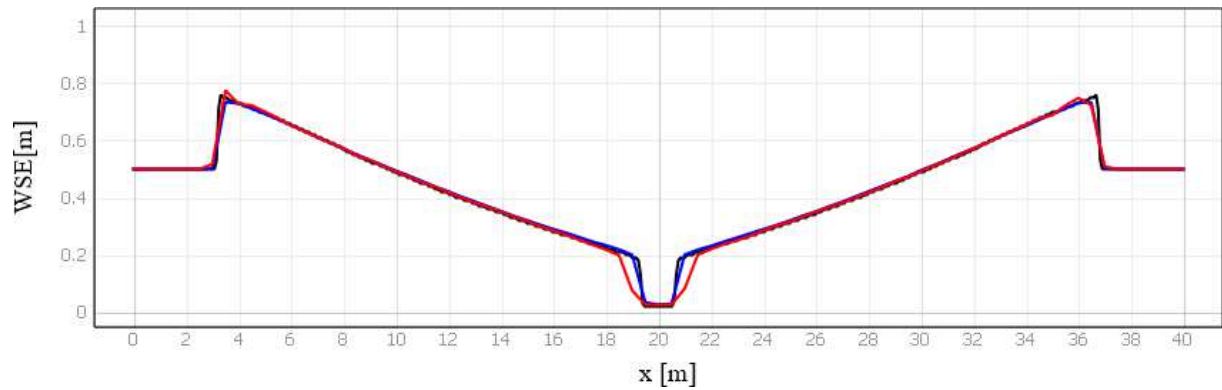


Abbildung A-8: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=4s$ für das feine Netz

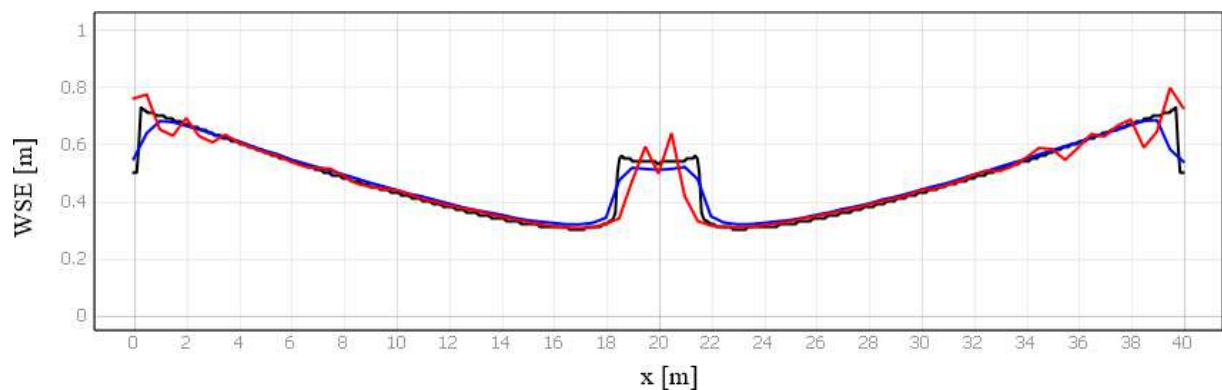


Abbildung A-9: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=5s$ für das grobe Netz

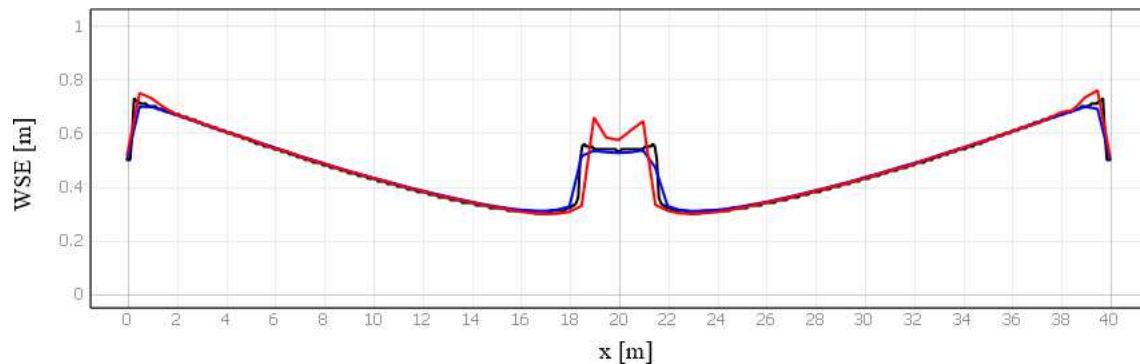


Abbildung A-10: Wasserspiegelauslenkung im Querschnitt der Domain zum Zeitpunkt $t=5s$ für das feine Netz

— Referenzlösung
— BASEMENT
— Hydro_AS-2D

Test-Case 2: Three humps

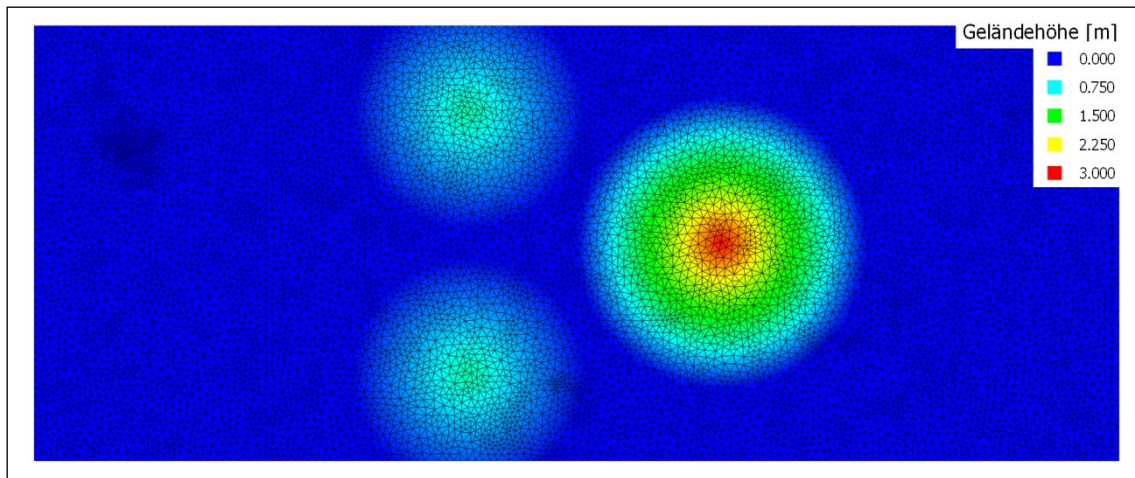


Abbildung A-11: Geländehöhe



Abbildung A-12: Initialwassertiefe

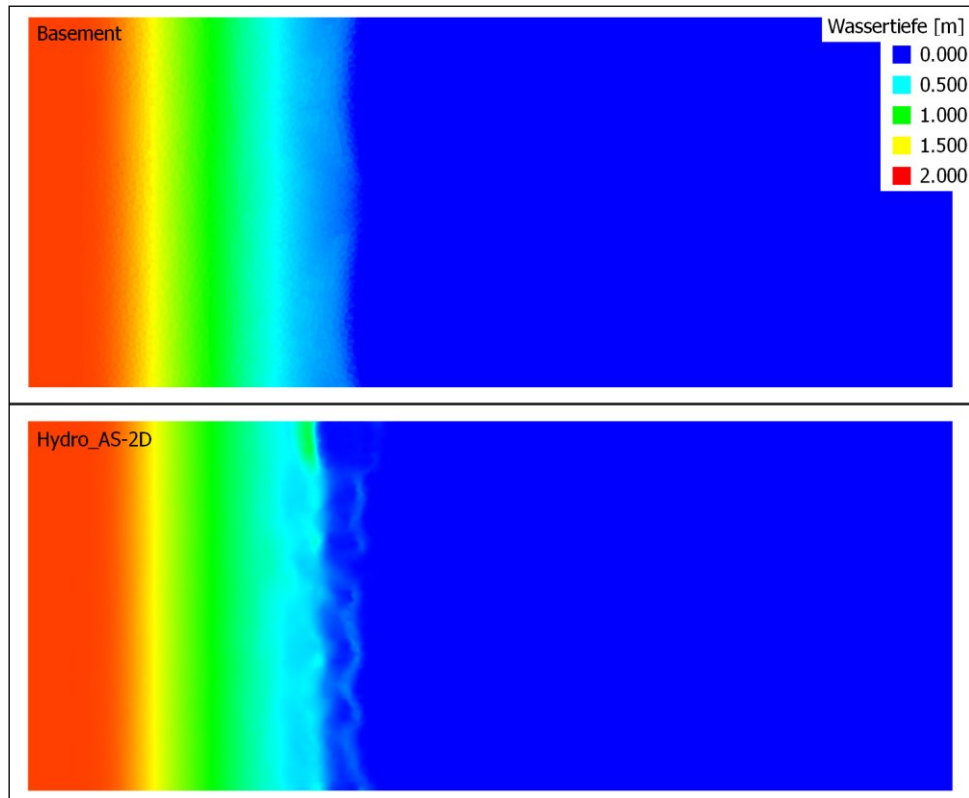


Abbildung A-13: Wassertiefe zum Zeitpunkt $t=2s$

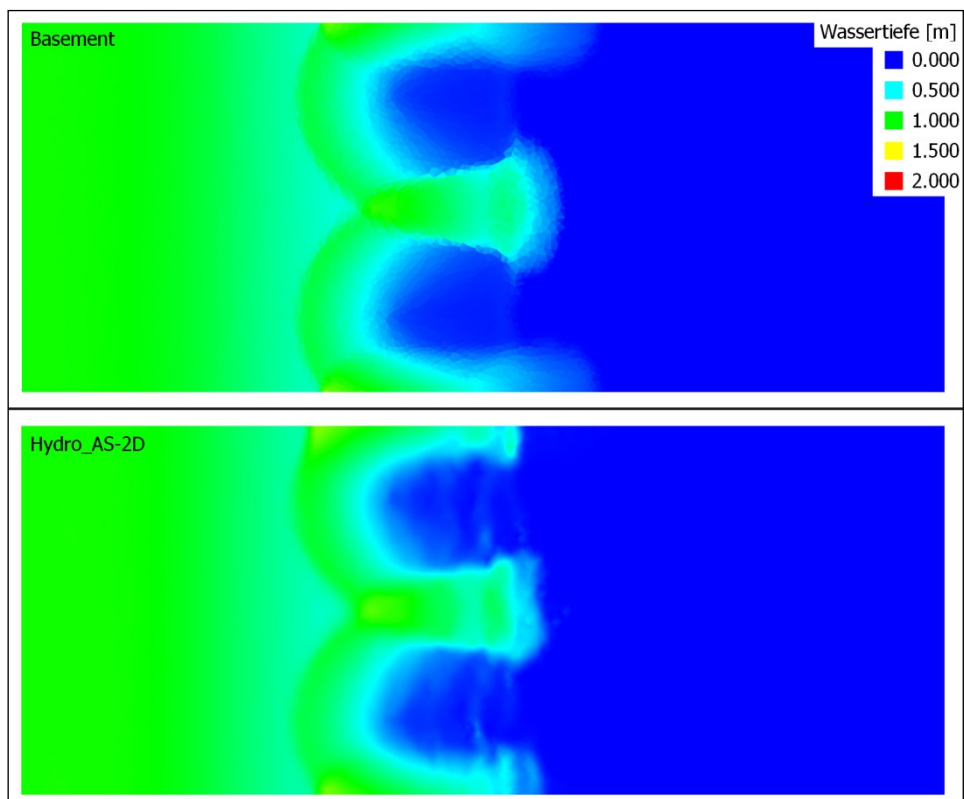


Abbildung A-14: Wassertiefe zum Zeitpunkt $t=6s$

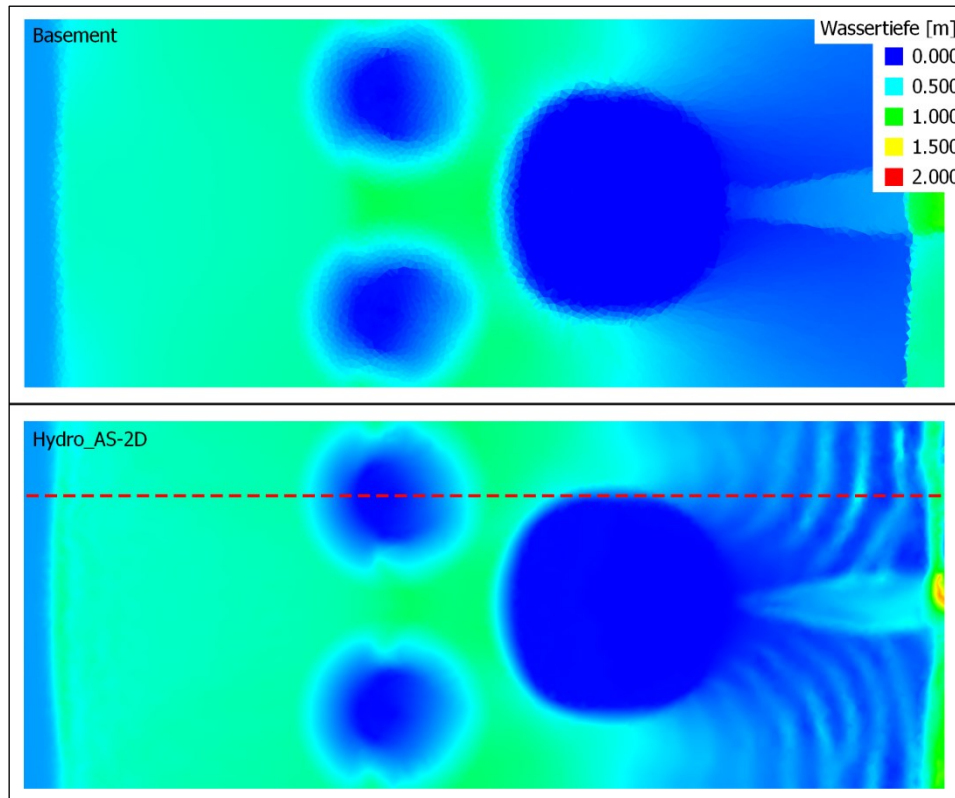


Abbildung A-15: Wassertiefe zum Zeitpunkt $t=18s$

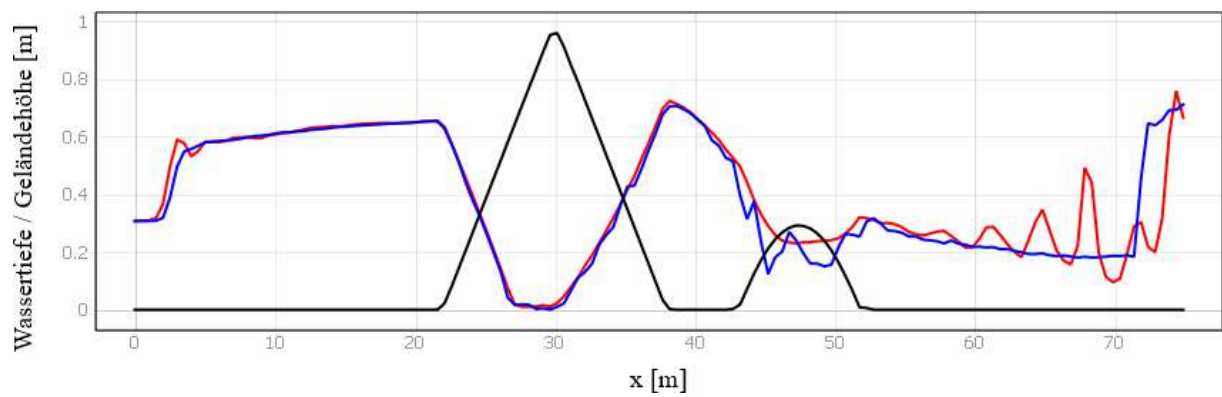
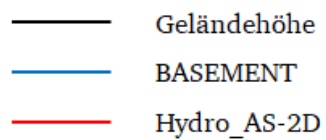


Abbildung A-16: Wassertiefe für $t=18s$ im markierten Querschnitt



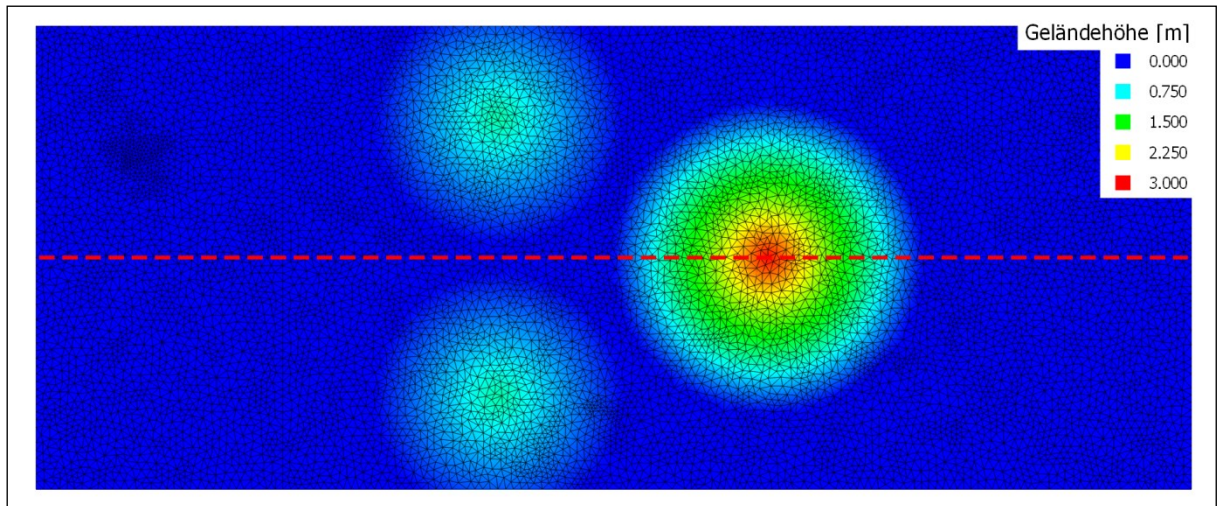


Abbildung A-17: Querschnitt 1

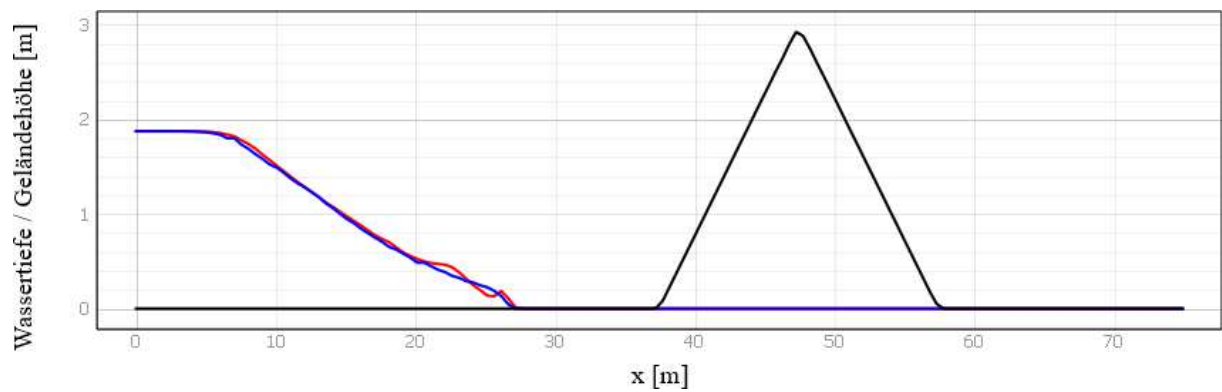


Abbildung A-18: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt $t=2s$

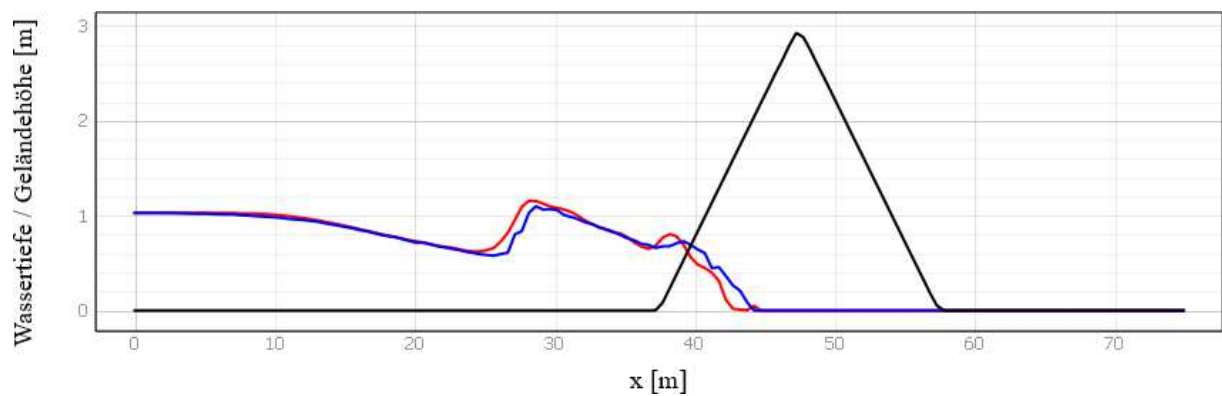


Abbildung A-19: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt $t=6s$

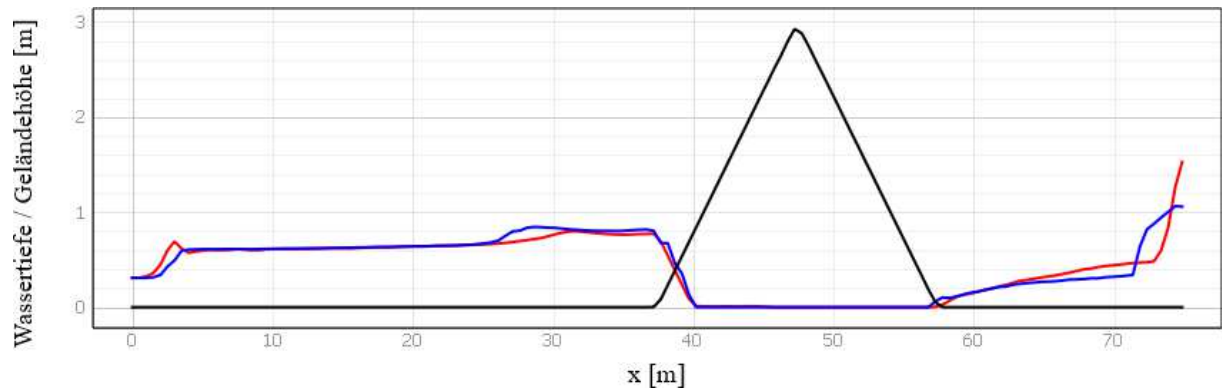


Abbildung A-20: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 1 zum Zeitpunkt t=18s

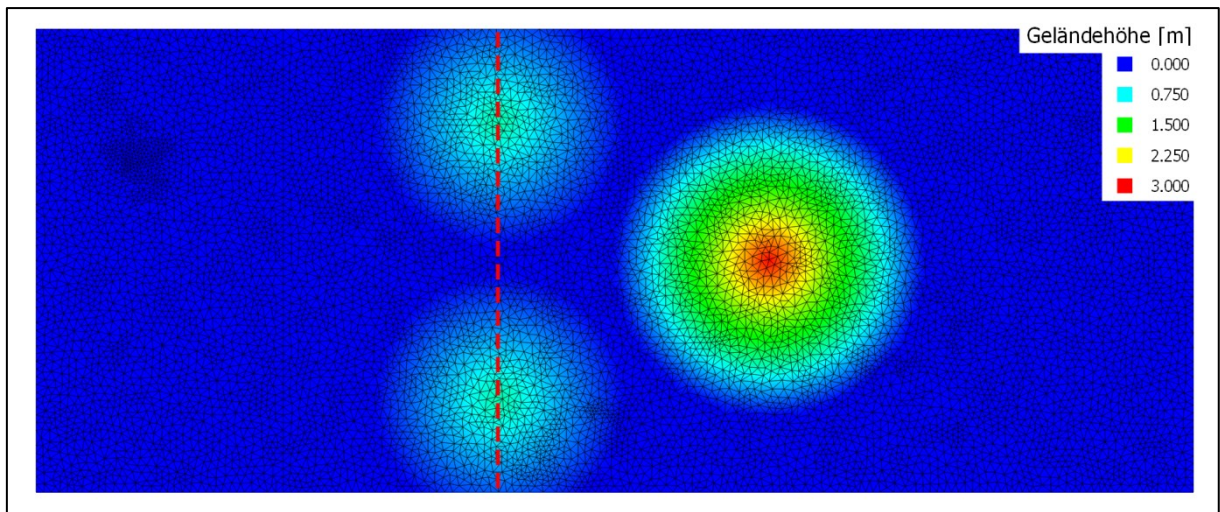


Abbildung A-21: Querschnitt 2

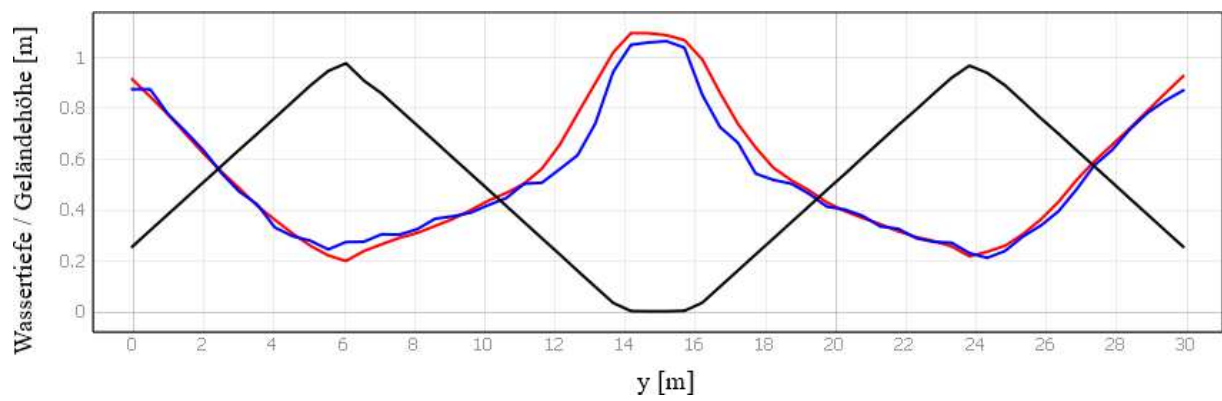


Abbildung A-22: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 2 zum Zeitpunkt t=6s

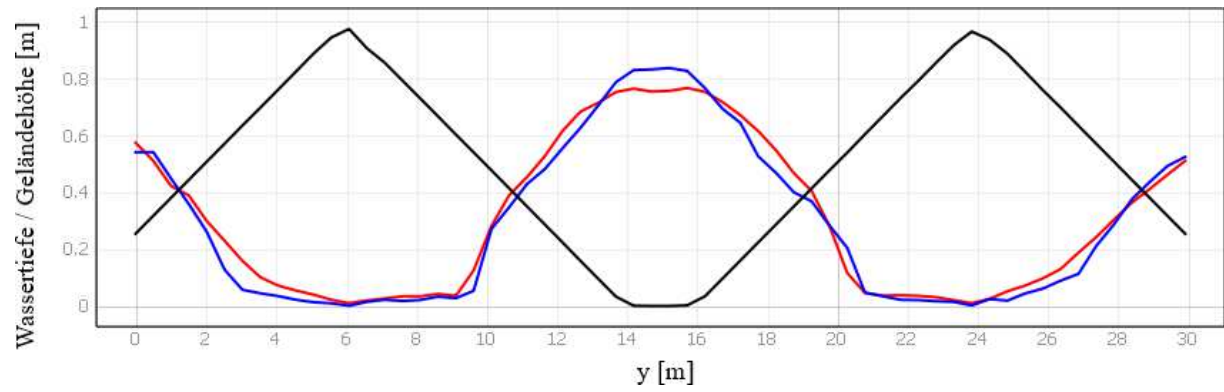


Abbildung A-23: Wassertiefe/Geländehöhe im Querschnitt 2 zum Zeitpunkt $t=18$ s

A.2 Verteilung der Landnutzung und der zugehörigen Rauheitsbeiwerte

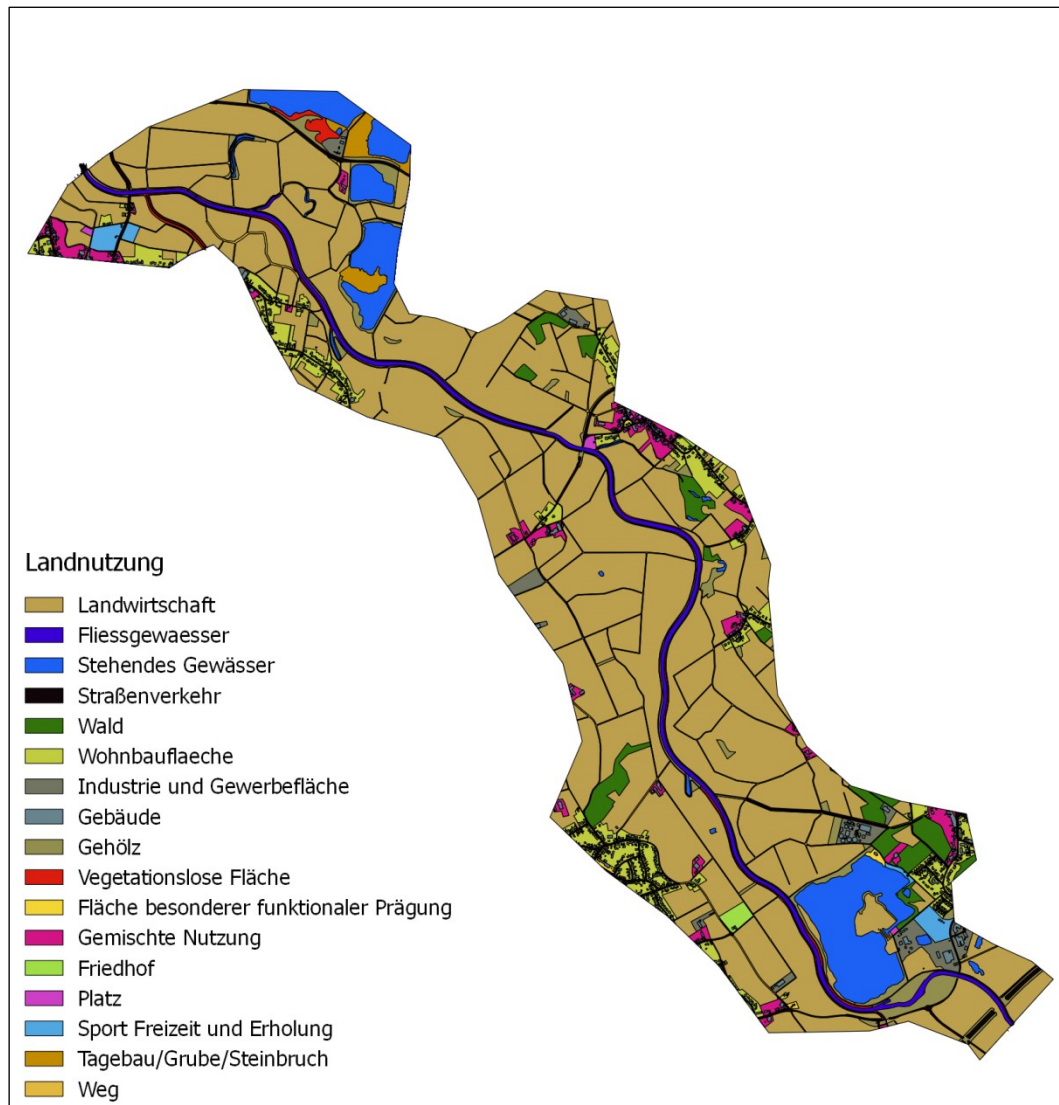


Abbildung A 24: Verteilung der Landnutzung im Modell

Tabelle A 1: Landnutzung und zugehörige k_{st} -Werte

Landnutzung	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
Landwirtschaft	25
Fließgewässer	28
Stehendes Gewässer	33

Straßenverkehr	60
Wald	18
Wohnbaufläche	22
Industrie- und Gewerbefläche	30
Gebäude	-
Gehölz	20
Vegetationslose Fläche	20
Fläche besonderer funktionaler Prägung	26
Gemischte Nutzung	26
Friedhof	24
Platz	50
Sport Freizeit und Erholung	26
Tagebau/Grube/Steinbruch	24
Weg	50

Literaturverzeichnis

- AQUAVEO (2018): Abgerufen am 14.02.2019 von
<https://www.aquaveo.com/software/sms-pricing>
- BASEMENT Reference Manual (2018): Abgerufen am 07.02.2019 von
http://people.ee.ethz.ch/~basement/baseweb/download/documentation/doc-BASEMENT.html#block_2.4.2
- Beffa, C. (1994): *Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen*. hg. von D. Vischer, Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich
- David, A. (2017): *Evaluation frei verfügbarer Simulationsmodelle zur zweidimensionalen Strömungssimulation in Fließgewässern*. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Darmstadt
- Haas, S. & Rieger, W. (2016): *Zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modellierung von Maßnahmen in der Aue im Einzugsgebiet der Mangfall*. Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, TU München
- Hydrotec (Januar 2018): Abgerufen am 07.02.2019 von
https://www.hydrotec.de/software/lizenzen_preise/
- Malcherek, A. (2009): *Fließgewässer - Hydromechanik und Wasserbau*. Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München
- Mandlbürger, G., Höfle, B., Briese, C., Ressler, C., Otepka, J., Hollaus, M., & Pfeifer, N. (August 2009): *Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft (öwaw), S. 89-97, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Martin, H. (2011): *Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Nucij, M. (2015): *Flussnetzgenerator Beuntzerhandbuch*. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen
- Nujic, M. (2006): *LASER_AS-2D Ausdünnung und Aufbereitung von Laserdaten für die 2d-Modellierung*. Aachen

- Nujic, M. (2016): *Hydro_AS-2D Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wassrwirtschaftliche Praxis*. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen
- ÖWAV. (2014): *Fließgewässermodellierung - Arbeitsbehelf Hydrodynamik*. ÖWAV, Wien
- Rothe, B. & Loch, E. (November 2018): *Modellsteuerung mit Scripting in HYDRO_AS-2D 5.0*. Hydrothemen Nr. 35, S. 6-7, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen
- Rousselot, P. (2013): *BASEplane 2D*, BAFU Schulung.Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich
- Shewchuck, J. R. (2005): *Triangle*. Abgerufen am 07.02.2019 von <https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>
- Toro, E. (2001): *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. John Wiley, Chichester, New York
- Umach, L. (2014): *Bedeutung der Approximation von Kornverteilungskurven bei der zweidimensionalen numerischen Simulation von Geschiebetransportprozessen*. innsbruck university press, Innsbruck
- Vanza, D., Siviglia, A., & Toro, E. (2016): *Pollutant transport by shallow water equations on unstructured meshes: Hyperbolization of the model and numerical solution via a novel flux splitting scheme*. Journal of Computational Physics 321, S. 1-20, Elsevier
- Vetsch, D., Siviglia, A., Caponi, F., Ehrbar, D., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., Facchini, M., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R. (2018a): *System Manuals of BASEMENT, Version 2.8.- Reference Manual*. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich
- Vetsch, D., Siviglia, A., Caponi, F., Ehrbar, D., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., Facchini, M., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R. (2018b): *System Manuals of BASEMENT, Version 2.8.- Reference Manual*. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich

Vetsch, D., Siviglia, A., Caponi, F., Ehrbar, D., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., Facchini, M., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R. (2018b): *System Manuals of BASEMENT, Version 2.8.- User Manual*. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich

Abschlussarbeit von

Herrn Julius Reich

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, Julius Reich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 26.02.2019



Unterschrift
